**Jean-Claude Taymans**

# Les recycleurs et la plongée loisir

## La bonne pratique du Dräger Dolphin

Théorie générale des recycleurs.
Préparation des machines.
Calcul de la boucle de recyclage, de l'autonomie.
Planification des plongées.

JCT Consulting – Moby Dick Diving School

## Avertissement

Le but de cet ouvrage n'est pas de remplacer une formation adéquate dispensée par des instructeurs qualifiés mais de donner aux plongeurs, Divemasters et instructeurs des bases pour apprendre à utiliser les recycleurs dans le cadre de la plongée loisir. Avant d'entamer une formation sur recycleur, il est indispensable d'avoir acquis une formation et expérience en Nitrox et de pouvoir planifier correctement une plongée avec ce mélange.

Vous pouvez trouver toutes les informations sur le Nitrox dans le « tome 1 » de cet ouvrage : « Nitrox Gaz Mixing and Blending »

***Les recycleurs sont des machines qui peuvent vous tuer ou vous blesser gravement, si vous ne les utilisez pas correctement. Il est indispensable de suivre une formation adaptée à chaque machine, et d'être particulièrement rigoureux dans la préparation de celle-ci.***

**Un « Recycleux » qui ne connait pas la composition du mélange qu'il respire ou qui a omis de vérifier sa machine est un « Recycleux » mort.**

**Niveaux :**

- Spécialisation plongeur S.C.R. (Semi Closed Rebreather)
- Instructeurs S.C.R. (Semi Closed Rebreather)

Chapitres et paragraphes plus particulièrement destinés aux instructeurs.

Indique un mode opératoire.

Indique des points à lire avec une attention toute particulière.

L'auteur décline toute responsabilité pouvant provenir d'une éventuelle erreur ou d'un usage erroné des données de cet ouvrage.
Toute reproduction d'un extrait quelconque de cet ouvrage, par quelque procédé que ce soit, notamment par imprimerie, photocopie, microfilm …est strictement interdite sans l'autorisation de l'auteur. Toute reproduction faite sans le consentement de l'auteur constituerait une contrefaçon sanctionnée par le code pénal. Tous droits de traduction, d'adaptation, et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays

Copyright © Jean-Claude Taymans - Tous droits réservés
Rue Mouzin 2 - 7390 Wasmuël
D/Mai 2006/ Jean-Claude Taymans: Editeur

# Table des matières


**HISTORIQUE ..... 5**

**UN RECYCLEUR C'EST QUOI ? ..... 5**

AVANTAGES DES RECYCLEURS ..... 5
INCONVÉNIENTS DES RECYCLEURS ..... 6
COMPARAISON AVEC LES CIRCUITS OUVERTS ..... 6

**CONFIGURATION GÉNÉRALE ..... 6**

LES TYPES DE RECYCLEURS ..... 6
*Les CCR.* ..... *6*
*Les SCR* ..... *7*
CHOIX DE LA MACHINE ..... 7

**DESCRIPTION DE LA MACHINE. ..... 8**

DESCRIPTION GÉNÉRALE ..... 8
*La bouteille (1)* ..... *8*
*Le détendeur (2)* ..... *8*
*Le By-pass (3)* ..... *8*
*Les buses soniques (4)* ..... *9*
*Le sac inspiratoire (5)* ..... *9*
*L'embout et les tuyaux annelés (6)* ..... *9*
*Le sac expiratoire (8)* ..... *9*
*Le scrubber ou canister (9)* ..... *10*
*La sonde oxygène (11)* ..... *10*
*L'oxygauge (12)* ..... *10*
*Les ordinateurs (12)* ..... *10*
*La chaux sodée* ..... *11*

**PRÉPARATION DE LA MACHINE ..... 11**

CHARGEMENT DU SCRUBBER ..... 11
*Procédure de remplissage* ..... *12*
L'EMBOUT, LES TUYAUX ANNELÉS ET LES CLAPETS ..... 12
*Procédure de vérification* ..... *12*
LE SAC D'EXPIRATION ET LE SAC D'INSPIRATION ..... 12
*Procédure d'inspection des sacs* ..... *12*
LA BOUTEILLE ..... 12
*Procédure de vérification et de mesure.* *12*

**MISE EN PLACE DANS LA COQUE. ..... 13**

PROCÉDURE DE MONTAGE ..... 13

**TEST ET MESURE DE CONFIGURATION DE LA MACHINE ..... 14**

VÉRIFICATION DU DÉBIT DE LA BUSE SONIQUE. 14
*Procédure de mesure.* ..... *14*

**LES TESTS D'ÉTANCHÉITÉS ..... 14**

*Procédure* ..... *14*
TEST D'ÉTANCHÉITÉ POSITIF ..... 14
*Procédure* ..... *14*

**LESTAGE DE LA MACHINE ..... 14**

**HYPERCAPNIE ..... 15**

PRÉVENTION ..... 15
SYMPTÔMES ..... 15
CONDUITE À TENIR. ..... 15

**HYPOXIE ..... 15**

CAUSES ..... 15
PRÉVENTION ..... 15
SYMPTÔMES ..... 15
CONDUITE À TENIR. ..... 16

**HYPEROXIE ..... 16**

CAUSES ..... 16
PRÉVENTION ..... 16
SYMPTÔMES ..... 16
CONDUITE À TENIR. ..... 16

**INGESTION DE « SOUPE CAUSTIQUE » ..... 16**

CAUSES ..... 16
PRÉVENTION ..... 16
SYMPTÔMES ..... 16
CONDUITE À TENIR. ..... 16

**BRÛLURE CAUSTIQUE EN PRÉPARANT LE SCRUBBER ..... 16**

PRÉVENTION ..... 16
CONDUITE À TENIR. ..... 16

**LA CONSOMMATION MÉTABOLIQUE D'OXYGÈNE. ..... 17**

**DÉTERMINATION DU « BEST MIX » .. 17**

**CALCUL DE LA FRACTION D'OXYGÈNE DANS LA BOUCLE DES RECYCLEURS EN MODE ACTIF. ..... 17**

**DÉTERMINATION DU DÉBIT MINIMUM DE LA BUSE SONIQUE. ..... 18**

**CALCUL DE LA FRACTION D'OXYGÈNE DANS LA BOUCLE DES RECYCLEURS EN MODE PASSIF ..... 18**

**CALCUL DE LA DURÉE MAXIMUM D'UTILISATION DE LA CHAUX ..... 18**

**ESTIMATION DE SA CONSOMMATION MÉTABOLIQUE ..... 19**

**CALCUL DE LA PRESSION, DE LA TEMPÉRATURE, DE LA VITESSE, DE LA MASSE VOLUMIQUE À LA SORTIE DE LA BUSE SONIQUE, DU DÉBIT ET DU COEFFICIENT ADIABATIQUE ..... 19**

**CALCUL DE LA PROFONDEUR MAXIMALE « MÉCANIQUE » D'UTILISATION..... 20**

**CALCUL DE LA PROFONDEUR MAXIMALE « PHYSIOLOGIQUE » D'UTILISATION..... 20**

**CALCUL DE L'AUTONOMIE..... 20**

**DÉTERMINATION DU SYSTÈME DE BAILOUT ..... 21**

BAILOUT MINIMALISTE ..... 21
BAILOUT LÉGER ET ÉCONOMIQUE ..... 21
BAILOUT INDÉPENDANT. ..... 22
DÉTERMINATION DE LA CAPACITÉ MINIMALE DU BAILOUT..... 22

**PARAMÉTRAGE ET CONFIGURATION DE LA MACHINE ..... 22**

**GESTION DE LA DÉCOMPRESSION ..... 22**

MÉTHODE SÉCURITAIRE..... 22
MÉTHODE AGRESSIVE ..... 23
GESTION ÉLECTRONIQUE ..... 23

**PLANIFICATION DE LA PLONGÉE..... 23**

PROCÉDURE DE PLANIFICATION. ..... 23

**PROCÉDURE DE PLONGÉE ..... 24**

MISE À L'EAU ..... 24
*Procédure de mise à l'eau en surface... 25*
DESCENTE..... 25
*Procédure de descente..... 25*
DÉPLACEMENT HORIZONTAUX..... 25
REMONTÉE..... 25
CONDUITE À TENIR EN CAS D' URGENCE. ... 25
*Procédure de passage sur bailout..... 25*

**LE « WHAT IF »..... 26**

**PROBLÈMES AU MONTAGE ET AUX TESTS ..... 26**

PRÉ MONTAGE DE LA MACHINE..... 26
MONTAGE DE LA MACHINE ..... 27
PROBLÈMES EN IMMERSION ..... 28

**DÉMONTAGE ET RINCAGE..... 29**

PROCÉDURE..... 29
DÉSINFECTION ..... 29

**ENTRETIEN..... 30**

**STOCKAGE..... 30**

**MODIFICATION SUR LA MACHINE.... 30**

**BIBLIOGRAPHIE..... 30**

**ANNEXES ..... 31**

**PARAMÈTRAGE DU DOLPHIN** ..... 32
**PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES GAZ.**..... 34
**CALCUL DÉTAILLÉ DE LA FIO2** ..... 34
QUELQUES RECYCLEURS..... 35
QUELQUES ORDINATEURS ET ACCESSOIRES ..... 35
**FEUILLE DE PLANIFICATION S.C.R.** ..... 36
**PLONGEUR RECYCLEUR S.C.R. (SEMI CLOSED REBREATHER ) NITROX** ..... 37
PRÉREQUIS :..... 37
MODALITÉS : ..... 37
THÉORIE ..... 37
PLONGÉE EN MILIEU NATUREL. ..... 38

# Chapitre 1

Historique
Description générale
Contexte d'utilisation
Choix de la machine

## Historique

1680 : Le mathématicien, physicien, physiologiste Italien Giovanni Alphonso Borelli émet l'idée qu'il est possible de purifier l'air expiré.
1726 : Stephen Hale fabrique la première vraie cartouche d'épuration avec de la flanelle imbibée d'eau de mer et de tartre. Cet appareil devait servir comme moyen de secours dans les désastres miniers.
1878 : L'officier de marine Henry Fleuss développe un appareil à l'oxygène pur et plonge à une profondeur de 5m. La cartouche épuratrice est constituée par une corde imbibée de potasse caustique.
1881 : Achilles Khothinsky et Simon Lake font breveter une cartouche d'épuration utilisant l'hydroxide de barium.
1905 : Des machines Henry Fleuss modifiées sont utilisées pour sauver les sous-mariniers.
1912 : Dragër met au point un appareil à l'$O_2$ avec une autonomie de deux heures.
1915 : Des recycleurs à l' oxygène pur sont utilisés pour le tournage du film 20.000 lieues sous les mers.
1936 : Adaptation de la machine de Henry Fleuss par la marine italienne pour ses nageurs de combats.
1950-95 : Les grandes marines mettent au point des machines pour leurs nageurs de combat. Le succès auprès des plongeurs sportifs n'est pas au rendez-vous.
1995 : Dräger met au point un recycleur semi-fermé L' Atlantis I à usage grand public.
1998-1999 : Fort du succès au USA de l'Atlantis Dräger continue ses recherches pour aboutir aux Dolphin et au Ray qui sont réellement des machines « grand public » simples, fiables et peu onéreuses[1]
2002 : OMG concurrence Dräger avec un semi fermé l'Azimut

## Un recycleur c'est quoi ?

Lorsque nous respirons sur un circuit ouvert nous ne consommons que 5% de l'oxygène respiré. Le restant de ce précieux gaz est expulsé dans l'eau avec l'azote et le produit de la combustion de l'oxygène par notre organisme, le $CO_2$. Cette technologie engendre un gaspillage énorme, le recycleur est une machine qui permet d'une part de ne plus gaspiller l'oxygène qui reste dans la boucle respiratoire et d'autre part d'éliminer le $CO_2$ du circuit. La boucle de recyclage[2] comprenant un embout avec des clapets, des tuyaux annelés, un sac d'inspiration, un sac d'expiration[3] et une cartouche filtrante[4] pour éliminer le $CO_2$ est commun à tous les recycleurs. Ce qui va changer c'est la manière d'injecter le ou les gaz respiratoire(s).

### Avantages des recycleurs

- Fonctionnement très silencieux, ce qui permet aux photographes d'approcher facilement les animaux.
- Pas ou peu de bulles, le peu de bulles expulsées ne le sont pas au niveau de l'embout ce qui représente pour le photographe de ne jamais avoir de bulles devant l'objectif.
- Très confortable.
- Grande autonomie.
- Rapport autonomie/poids du matériel très avantageux.
- Réduction du risque d'ADD[5] (mélanges suroxygénés).
- Respiration d'un mélange chaux et humide par réaction du $CO_2$ sur la chaux sodée de l'épurateur.

[1] Surtout le Dräger Ray, machine « grand public » par excellence.
[2] Rebreather loop est le terme technique le plus utilisé.
[3] Les recycleurs à l'$O_2$ pur n'ont pas besoin de sac expiratoire, car le volume de gaz neutre (Azote) est nul.
[4] Scrubber est le terme le plus utilisé
[5] Accident de décompression

## Inconvénients des recycleurs

- Prix d'achat plus élevé que le matériel classique.
- Nécessite une formation spécifique pour chaque machine ou groupe de machine.
- Besoin de rigueur dans la préparation du matériel et de la planification de la plongée.
- Prix de revient des consommables par plongée plus important que pour le circuit ouvert, sauf pour les recycleurs Trimix.
- Entretien plus important que pour les circuits ouverts.

## Comparaison avec les circuits ouverts

| | **Circuit ouvert** | **Recycleur** |
|---|---|---|
| Autonomie | Faible | Importante |
| Rapport autonomie/poids | Peu élevé | Elevé |
| Composition du gaz respiré | Fixe durant la plongée | Variable durant la plongée |
| Qualité du gaz respiré | Froid et sec | Chaud et humide |
| $PPO_2$ | Variable | Fixe ou variable svt la machine |
| $CO_2$ dans le circuit respiratoire | Impossible[6] | Possible si négligence[7] |
| Poumon ballast | Oui | Non |
| Prix d'achat | Moins élevé | Plus élevé |
| Entretiens | Plus facile | Moins facile |
| Coût des entretiens | Moins important | Plus important |

## Configuration générale

Les recycleurs peuvent se placer sur le dos, sur le ventre avec les sacs inspiratoires et expiratoires, dans la coque ou sur les épaules. La position des sacs influe sur le confort respiratoire. Si le plongeur est horizontal avec $P_{sac}$ qui est la pression dans les sacs, $P_{hyd}$ qui est la pression hydrostatique au niveau de l'embout les conforts respiratoires sont donnés par le tableau ci dessous.

| **Position des sacs** | **Résistance inspiratoire** | **Résistance expiratoire** | **$P_{sac}$ / $P_{hyd}$** |
|---|---|---|---|
| Dorsal | non | oui | $P_{sac} < P_{sac}$ |
| Ventral | oui | non | $P_{sac} > P_{sac}$ |
| Epaules | non | non | $P_{sac} = P_{sac}$ |

## Les types de recycleurs

Il existe deux grandes familles de recycleurs les circuits fermés ou CCR (Closed Circuit Rebreather) et les recycleurs semi-fermés SCR (semi-Closed Rebreather). C'est principalement les SCR qui sont utilisés en plongée loisir.

| **Types** | **Mélange/mode** | **Gestion** | **Utilisation** | **Profondeur maximum** |
|---|---|---|---|---|
| CCR | Oxygène | Militaire (Davis, Oxygers…) Civil (Castaro C96…) | | 6 m |
| | Mélange Nx-Tx | Electronique | TEC (Inspiration, Evolution…) | Pas de limite |
| | | Mécanique | TEC (KISS) | Pas de limite |
| SCR | Passif | Militaire (DC 55…) Civil (EDO 04, RB80) | | Non divulgué |
| | Actif | Loisir (Dolphin, Ray, Azimut… | | 20 à 40 m |

***Les CCR.***

Les CCR Oxygène sont des outils parfaits pour des intrusions discrètes de commandos. Ce sont des machines très simples, légères, parfaitement silencieuses et qui ne font aucunes bulles. Une bouteille injecte via un détendeur à la demande de l'oxygène pur dans un sac d'inspiration qui est par la suite utilisé par le plongeur via un embout buccal. Embout qui comprend un second tuyau pour les gaz expirés qui sont purifiés dans un filtre. Il n'y a

[6] Impossible si les bouteilles ont été gonflées correctement.
[7] Comme nous le verrons plus loin ce problème est éliminé si on rempli correctement la cartouche de chaux.

pas de sac d'expiration, ce qui exclu l'utilisation de Nitrox.
Les CCR mélange : Ce sont des machines très complexes, des véritables usines à gaz qui fabriquent les mélanges durant la plongée en fonctions des paramètres préétablis et de la profondeur. Ils présentent l'avantage de pouvoir maintenir la $PPO_2$ constante durant toute la plongée, ce qui réduit considérablement les paliers de décompression mais les budgets, formation, achat et entretien sont pharaoniques. La complexité des machines est telle qu'il faut suivre une formation pour chaque machine auprès d'un agent d'usine. Le mélange est fabriqué à partir d'un gaz le « diluent » qui peut être un Nitrox ou un Trimix et de l'injection d'oxygène pur. Qui est le seul gaz consommé par l'organisme, les gaz neutres : Hélium, Azote tournant en boucle dans la machine. Il est donc très facile en agissant sur l'injection d'$O_2$ de maintenir la $PPO_2$ constante. La gestion de l'injection de l' oxygène peut se faire soit électroniquement a l'aide d'une boucle de régulation comprenant des senseurs $O_2$ , analyseurs, ordinateurs et électro-vannes. La gestion peut aussi se faire manuellement à l'aide de vannes manuelles actionnées par le plongeur. La vanne manuelle d' $O_2$ étant doublée par une injection automatique[8] d'oxygène à raison de notre débit métabolique[9]. Il va de soi que dans ces systèmes il est impératif de connaître avec exactitude la quantité d'oxygène dans la boucle de recyclage.

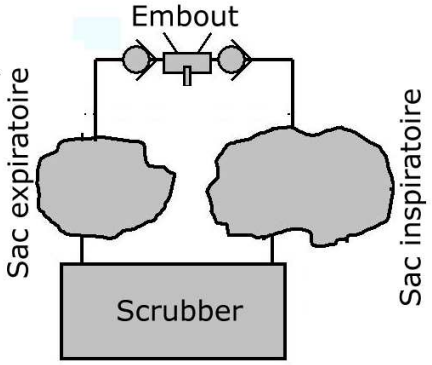
***Les SCR***

Les SCR sont des machines beaucoup plus simples qui utilisent un mélange préfabriqué de Nitrox. De ce fait elles ne doivent pas être équipées de coûteuses et délicates boucles de régulations. Le montage et l'entretien s'en trouvent très simplifiés. Cette simplification en fait des machines idéales pour la plongée loisir. Les machines peuvent être en mode passif ou actif.
En mode passif, l'injection de mélange est proportionnelle à la consommation métabolique du plongeur. Ce type de machine est principalement utilisé par les plongeurs démineurs. En mode actif le dédit est constant et ne s'adapte pas au métabolisme du plongeur. Malgré une consommation de gaz un peu plus importante, c'est néanmoins cette solution qui a été adoptée dans la plupart des machines de loisir, à cause de la simplicité d'une part et surtout par le fait qu'il est impossible d'avoir une concentration d'oxygène dans le sac inspiratoire supérieure à la concentration dans la bouteille.

## Choix de la machine

Le choix de la machine dépend incontestablement de l'usage que l'on veut en faire et du budget. Pour des plongées Tec le choix va plutôt se porter sur les CCR[10]. Pour la plongée loisir le choix sera plutôt axé sur des machines plus simples et moins coûteuses comme les SCR. Dans le cadre de nos cours notre choix s'est porté sur un SCR en mode actif le « Dräger Dolphin. Ce choix à été guidé par les considérations suivantes : Machine ayant fait ses preuves, solide, facile à monter et à entretenir, pièces de rechange faciles à trouver mais surtout c'est la machine la plus répandue dans les centres de plongée.

Principe commun à tous les recycleurs



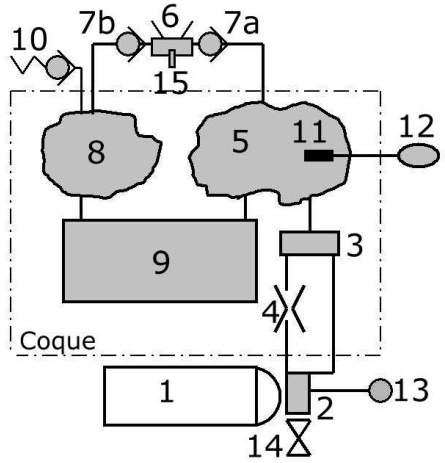
[8] C'est le système KISS (Kip Is Simple Stupid) de Gordon Smith
[9] Débit minimum d'oxygène que notre organisme à besoin pour vivre.

[10] Quoique de nombreux spéléos optent pour le SCR.

# Chapitre 2

Description
Préparation de la machine
Les tests

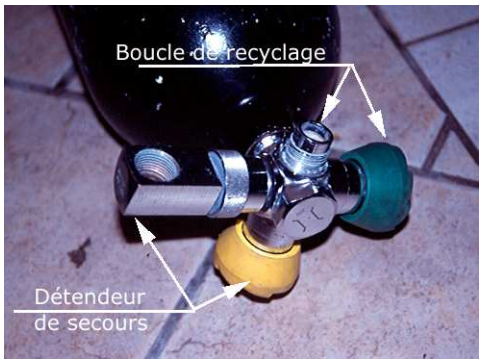
## Description de la machine.




### Description générale.

Le Nitrox de la bouteille (1) est détendu au niveau du détendeur (2) à la pression de 17,5 bars. Le flux est réparti d'une part vers le By-pass (3) et d'autre part vers la buse sonique (4). L'ensemble by-pass et buses soniques sont connectés directement sur le sac d'inspiration (5). Le sac d'inspiration (5) et le sac d'expiration (8) sont connectés à des connecteurs passe cloisons fixés à la coque de la machine. L'ensemble des tubes annelés avec les clapets anti-retours (7a et 7b) et l'embout (6) sont connectés à la partie extérieure des passe cloisons. Les sacs sont connectés directement sur le scrubber (9) fixé dans la coque à l'aide d'une sangle. Il n'est pas possible de mal monter les pièces, elles portent toutes des détrompeurs, bagues fléchées du sens de circulation du mélange, et codes de couleurs. La bague rouge indique le sens des gaz expirés.

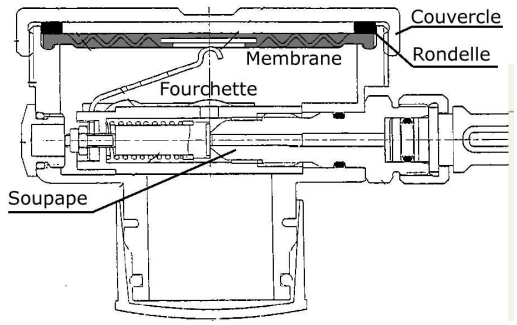
***La bouteille (1)***




La bouteille est une bouteille Nitrox qui doit être dégraissée et qui porte un robinet (14) ayant une connectique spéciale pour le détendeur Dräger. Il existe des robinets à deux sorties pouvant accueillir un détendeur de secours. La capacité standard de la bouteille livrée avec la machine est de 5 litres mais on peut aussi monter une bouteille de 10 litres

***Le détendeur (2)***

Il s'agit d'un détendeur à membrane qui délivre une pression moyenne de l'ordre de 17,5 bars. Il n'est pas possible d'utiliser un détendeur classique de plongée, la pression étant trop faible que pour assurer le bon fonctionnement des buses soniques[11].



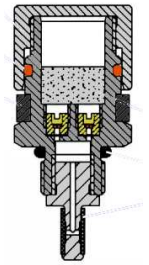

***Le By-pass (3)***

C'est l'équivalent au deuxième étage d'un détendeur pour circuit ouvert. C'est une pièce essentielle dans la machine, sans elle il ne serait pas aisé de descendre. En effet le By-pass assure le bon gonflage du sac inspiratoire. Lorsque la pression extérieure augmente et fait diminuer le volume du sac inspiratoire[12] , il se produit une dépression au niveau de la membrane du by-pass qui via la fourchette ouvre le clapet qui permet l'injection du mélange dans le sac.

[11] Comme on le démontrera par la suite dans cet ouvrage.
[12] Suivant la loi de Boyle-Mariotte

***Les buses soniques (4)***

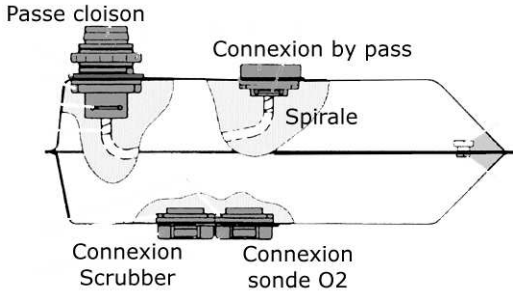
La buse sonique est la clé de voûte dans le fonctionnement de la machine. C'est la buse sonique qui délivre dans le système la quantité d'oxygène[13] indispensable à notre vie. Les buses soniques sont des tuyères qui ont un débit massique[14] constant à condition que la pression en amont de la buse soit supérieure à la pression critique[15] au col de la tuyère. Pour des facilités de compréhension, de calcul et de mesure, elles sont néanmoins notées en débit volumique (litres/minutes). La machine possède quatre buses soniques visées directement sur le boîtier du by-pass. On n'en utilise qu'une à la fois, les autres étant obturées par des bouchons. Les débits nominaux sont inscrits sur chaque buse, elles sont repérées par un code de couleur et portent une indication du Nitrox recommandé .



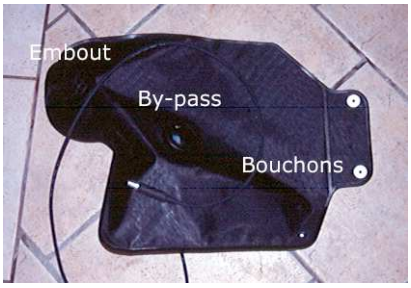
| Marquage | Qs min | Qs max | Code |
|---|---|---|---|
| EAN 60 | 5,1 | 6,4 | Gris |
| EAN 50 | 6,6 | 8 | Rouge |
| EAN 40 | 9,4 | 11,3 | Bleu |
| EAN 32 | 14,2 | 16,9 | Jaune |

Qs = Débit en litres / minutes

***Le sac inspiratoire (5)***

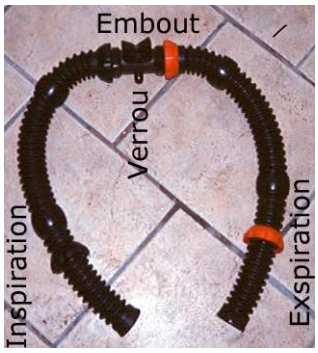



Il est très facile à reconnaître, c'est le sac qui a le plus de connexions et c'est le plus grand des deux sacs. Son volume est de l'ordre de 5 litres ce qui correspond au volume pulmonaire moyen de la plupart des individus. La connexion supérieure est munie d'un passe cloison de couleur noire. La connexion avant est destinée à recevoir le By-pass (3), une des connexions arrières sert pour la jonction du



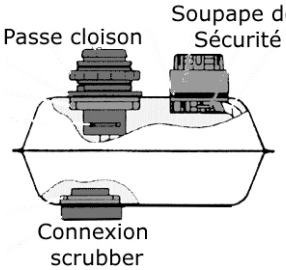

Scrubber (9) tandis que l'autre est destinée à recevoir la sonde d'$O_2$ (11). S'il n'y a pas de sonde, un bouchon est prévu pour obturer l'orifice. Ce sac est muni d'un petit bouchon de vidange pour faciliter le rinçage et la désinfection. Il y a l'intérieur du sac des spirales en plastique, ces spirales sont très importantes car elles empêchent le placage du sac lors de la descente. La machine montée ce sac recouvre le Scrubber.

***L'embout et les tuyaux annelés (6)***




L'embout d'un recycleur est beaucoup plus complexe que le simple embout des détendeurs classiques, c'est une des pièces maîtresse de la machine et hélas aussi une des plus fragile. L'embout est muni de deux clapets anti-retours (7a et 7b) qui ne sont pas destinés à empêcher le noyage du circuit, comme le pense à tort certains plongeurs mais qui sont destiné à empêcher le reflux de gaz. Ils sont là pour garantir que les gaz suivent le chemin prévu : c'est à dire vers le Scrubber via le sac d'expiration pour les gaz expirés et non pas vers le sac d'inspiration. L'embout est muni de deux tuyaux annelés. Les tuyaux sont annelés pour assurer un effet Venturi qui accélère la vitesse du gaz et assure de ce fait un confort respiratoire plus important. Pour éviter les entrées d'eau, le noyage du circuit et tous les risques inhérents à cette problématique, l'embout est prévu avec un verrou d'isolation (15).

***Le sac expiratoire (8)***



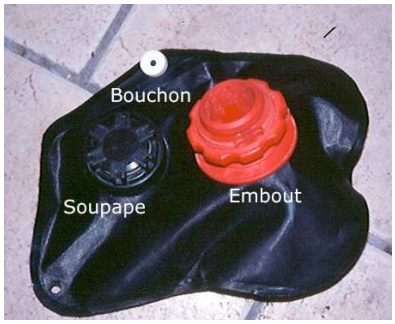

C'est le plus petit des deux sacs, il se trouve placé au-dessus du scrubber (9). Sa fonction est double d'une part il collecte les gaz expirés servant ainsi de

[13] Oxygène délivré sous forme de Nitrox dans les machines SCR

[14] Nombre de molécules de gaz délivrée dans l'unité de temps (moles/minutes)

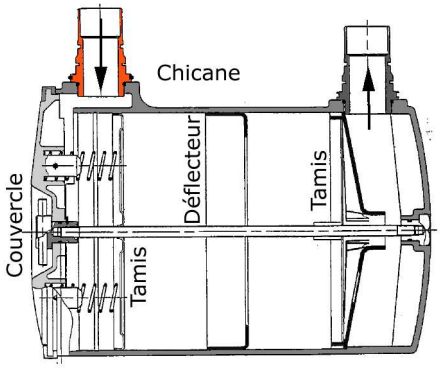
[15] Voir la détermination de la pression critique dans le chapitre quatre.

tampon au système de filtrage de $CO_2$ (Scrubber) et d'autre part il piège l'humidité du circuit évitant que celle-ci se mélange à la chaux sodée au risque de créer une « soupe caustique ». Le sac possède deux connexions : une à sa partie inférieure pour le Scrubber et une à la partie supérieure munie d'un passe cloison de couleur rouge. Il est muni de la soupape de sûreté réglable(10) entre 15 et 25 millibars en vissant le boîtier de la soupape. Cette soupape et un ergo permettent la mise en place sans erreur du sac dans la coque. La connexion sur la coque est de couleur rouge ce qui indique que c'est du gaz expiré qui circule dans cette partie du circuit. Ce sac est muni d'un petit bouchon de vidange pour faciliter le rinçage et la désinfection




***Le scrubber ou canister (9)***

Le scrubber est loin d'être un simple bidon, il assure la fonction la plus importante dans la machine celle d'éliminer le $CO_2$ de la boucle de recyclage. C'est dans ce récipient qu'ont lieu les réactions chimiques qui permettent l'élimination de ce gaz dangereux. Pour




faciliter les réactions, les dimensions, la forme et la conception ne sont pas dues au hasard. Il faut d'une part que la vitesse de passage aux travers de la chaux ne soit pas trop rapide, pour laisser le temps à la chaux de faire son office. D'autre part que les pertes de charges ne peuvent pas être trop importantes, le tout est une question de compromis. Pour éviter un passage trop rapide et en ligne droite du gaz sans épuration il y a un déflecteur dans le récipient. Un remplissage adéquat joue un rôle primordial. Des chicanes sont aussi prévues pour éviter que des granules de chaux sodées migrent dans la boucle de recyclage et pour éviter que des gouttelettes d'eau se mélangent à la chaux. Le couvercle est aussi muni d'un système qui permet de maintenir par compression les granules en place. La pipe de connexion sur le sac d'expiration est jaune. La capacité du scrubber est de 2,25 kg de chaux sodée, ce qui assure une autonomie de l'ordre de 180 minutes.

***La sonde oxygène (11)***

Cette sonde est identique aux sondes utilisées dans les oxymètres[16]. La plupart des fabricants d'ordinateurs équipés d'une sonde proposent un kit de connexion pour le Dolphin. Il faut que la sonde soit adaptée à l'appareil de mesure.

***L'oxygauge (12)***

C'est un simple voltmètre à afficheur digital qui utilise le signal délivré par la sonde pour afficher la pression partielle d'oxygène. Deux alarmes sonores non paramétrables sont prévues à 1,4 et 1,6 bars. Comme tout oxymètre il faut calibrer la mesure dans l'air avant de plonger.

***Les ordinateurs (12)***

De nombreux fabricants proposent des ordinateurs avec une sonde O2, cette solution, quoique plus coûteuse qu'une simple gauge, est séduisante. L'ordinateur permet d'optimaliser la gestion de la décompression en tenant compte réellement de la PPO2 dans la boucle de recyclage.

A tout seigneur tout honneur le VR3 C2 (Nx en OC,SCR,CCR) ou VR3 C4(Nx et Tx en OC,SCR,CCR) c'est bon, c'est costaud, c'est fiable… bref c'est britannique. Sans doute le meilleur ordinateur de sa génération, l'interface graphique est très claire et ce qui ne gâche rien, il est possible de l'upgrader et de changer soit même les batteries. J'ai opté pour le VR3-C4 comme de nombreux « recycleux ». Dans le même style que le VR3 le challenger américain l'HS-Explorer et le moniteur PPO2[17] qui permet la connexion de trois sondes O2 ce qui n'est utile que si on modifie le Dolphin en KISS.

[16] Voir l'ouvrage Nitrox Gaz mixing and Blending.
[17] Le moniteur PPO2 n'a pas de fonction ordinateur.

Uwatec à mis sur le marché du recycleur l' AIRZ O2/ Oxy2, cette machine n'ayant pas encore vraiment fait ses preuves[18] dans ce créneau je me garderai bien d'émettre un avis. Un des avantages de la machine c'est la facilité de montage de l'Oxy2, directement sur le tuyau annelé et la transmission des données se fait sans câble.

### *La chaux sodée*

Sous le vocable de chaux sodée, se cache en fait un produit chimique assez complexe. Produits commercialisés sous divers noms : DiveSorb ou DiveSorb Pro (produits préconisés par Dräger[19]), SpheraSorb, Sofnoline… mais qui ont finalement des caractéristiques d'absorption très similaires. Il ne faut pas se faire d'illusions comme nous sommes tenu à une granulométrie relativement restreinte (construction du Scrubber, vitesse de circulation des gaz, pertes de charges) d'une marque à l'autre on ne va pas doubler les caractéristiques tout au plus gagner une trentaine de %. La granulométrie préconisée pour nos applications est de 1,5 – 5mm[20] en forme hémisphérique[21]. Les conditionnements sont variables : sachet de 1 kg à 3 kg, bidon de 5 à 25 kg suivant le fabricant. Une qualité essentielle est le faible taux de poussière dans l'absorbant

*Composition moyenne de l'absorbant*

| | | |
|---|---|---|
| Hydroxyde de calcium | $Ca(OH)_2$ | 70 à 80% |
| Hydroxyde de potassium | KOH | 1 à 2% |
| Hydroxyde de sodium | NaOH | 0 à 1% |
| Eau | $H_2O$ | 16 à 20% |

*Les réactions chimiques*

a) Réaction primaire avec l'humidité dans le système.

$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$

b)Réaction sur la chaux

$H_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O$ + calorie

$H_2CO_3 + 2NaOH \rightarrow Na_2CO_3 + 2H_2O$ + calorie

$H_2CO_3 + 2KOH \rightarrow K_2CO_3 + 2H_2O$ + calorie

*Capacité d'absorption*

La capacité d'absorption de $CO_2$ est de l'ordre de 100 à 130 lit par kilo ce qui correspond à 90 minutes de plongée par kilo d'absorbant. Des fabricants ajoutent un colorant qui vire au violet lorsque la chaux est saturée, mais cette méthode n'est pas vraiment fiable pour juger du degré de saturation de l'absorbant. Pour des chiffres précis il faut se rapporter aux indications des fabricants.

*Stockage*

Le produit doit être stocké dans son emballage au sec à une température comprise entre 0 et 35°C. Bien stockée, la durée de vie du produit est de l'ordre de 5 ans. Il faut éviter le contact avec l'eau ou d'autres substances chimiques

*Protection*

L'absorbant est un produit alcalin, il doit être manipulé avec précaution. Il faut éviter le contact avec la peau (surtout si elle est humide) et les yeux. Ne pas respirer la poussière ou l'absorber dans les voies digestives.

## Préparation de la machine.

C'est la partie la plus importante, votre santé voire votre vie peut dépendre de la manière et de la rigueur dont vous allez faire preuve dans la préparation de la machine. Si vous ne devez retenir qu'un seul chapitre : c'est celui-ci. Toutes les pièces s'emboîtent et se connectent sans problèmes : si l'une d'entre elle résiste ce n'est pas de sa faute, vous vous êtes probablement trompé. Un petit truc pour ne pas se tromper dans les couleurs. Le CO2 c'est dangereux, le danger c'est rouge donc toutes les parties du circuit qui contiennent du CO2 (circuit d'expiration) sont marquées en rouge

Chargement du Scrubber.

Le remplissage correct du Scrubber est d'une importance fondamentale pour la sécurité. Si vous remplissez le Scrubber à l'extérieur il vaut mieux le faire vent dans le dos pour éviter de recevoir dans les yeux de la poussière de chaux sodée. Il est important d'éviter la poussière de chaux sodée dans le Scrubber, celle-ci pouvant boucher les buses soniques et

[18] Retour d'expérience nettement moindre que pour le VR3 ou l'HS Explorer
[19] Ces produits sont commercialisés par Dräger
[20] Le DiveSorb à une granulométrie 2-4mm hémisphérique
[21] Il semble que c'est la forme qui donne le meilleur résultat

mettre en péril le fonctionnement de la machine. Au besoin tamiser la chaux.

***Procédure de remplissage***

1. Ouvrir le Scrubber, vider le contenu dans une poubelle destinée aux déchets chimiques, enlever le déflecteur et le poser le verticalement sur le sol.
2. Remplir au 2/3 de chaux sodée en tapotant le Scrubber pour bien répartir la chaux sodée et éviter les vides.
3. Remettre le déflecteur en place
4. Remplir de chaux sodée jusqu'au marquage de la tige en tapotant le Scrubber pour répartir la chaux sodée.
5. Nettoyer et vérifier le joint du couvercle.
6. Fixer le couvercle, le couvercle n'étant pas symétrique il n'y a qu'une manière de le monter.
7. Secouer le Scrubber pipes vers le bas pour éliminer les granules de chaux sodée qui pourraient passer accidentellement dans le circuit.

8. Vérifier l'étanchéité du système en bouchant à l'aide de la main la pipe noire et en soufflant dans la pipe rouge.

9. Vérifier s'il n'y a pas une résistance anormale au passage de l'air, il suffit de ne plus boucher de la main la pipe noire, l'air doit passer normalement.
10. Vérifier si lors des tests les joints n'ont pas bougé, en procédant comme au point (7). Aucune granule ne doit tomber.

## L'embout, les tuyaux annelés et les clapets.

Il est important que ces pièces soient montées dans le bon sens des flèches sur les tuyaux annelés et l'embout indique le sens de circulation des gaz. Une indication supplémentaire : l'écrou du côté expiration de l'embout est rouge. Lorsqu'on monte les clapets sur l'embout un truc pour ne pas se tromper : il faut que pour le tuyau d'expiration la tûte[22] de la membrane pointe vers l'embout et l'inverse pour l'inspiration

***Procédure de vérification***

1. Vérifier le sens des flèches et le code de couleur.
2. Secouer les tuyaux pour éliminer les traces d'eau.
3. Vérifier si le verrou de l'embout fonctionne normalement.
4. Vérifier le bon sens des clapets : ouvrez le verrou puis inspirez du côté du tuyau d'expiration (bague rouge) ; l'air doit passer au travers de tout l'annelé.

5. Vérifier l'étanchéité du clapet d'expiration : Soufflez dans le tube d'expiration (bague rouge), l'air ne doit pas passer.
6. Vérifier l'étanchéité du clapet d'aspiration : Aspirez dans le tube d'aspiration (bague noire), l'annelé doit se racrapoter.

## Le sac d'expiration et le sac d'inspiration

Il est essentiel que les sacs soient en bon état, le bon fonctionnement de la machine et votre vie peuvent en dépendre. Ce sont des éléments fragiles qu'il faut traiter comme les jeunes filles : tout en douceur.

***Procédure d'inspection des sacs.***

1. Vérifier visuellement si les sacs ne présentent pas de trous, déchirures, pliures.
2. Vérifier si tous les bouchons de rinçage sont bien remis correctement.
3. Assurez-vous de la propreté des connecteurs et vérifiez le bon fonctionnement des verrouillages de ceux-ci. .
4. Pour le sac expiratoire : vérifiez la présence des spirales en le tâtant délicatement.

## La bouteille

C'est plus classique, cela ressemble au circuit ouvert honorablement connu avec néanmoins une particularité : les informations de vos mesures vont servir à configurer votre machine.

***Procédure de vérification et de mesure.***

1. Inspecter visuellement l'état du robinet et des connecteurs DIN

[22] Excroissance qui maintient la membrane dans son support.

2. Mesurer la pression dans la bouteille.
3. Mesurer le % d'oxygène dans le mélange[23]
4. Noter ces informations car elles vont vous servir à calculer la FiO2, l'autonomie et configurer la machine.

## Mise en place dans la coque.

Maintenant que chaque élément constitutif de la machine a été vérifié, nous pouvons passer au montage final. Il n'y a qu'une manière de faire : la bonne. Si un élément résiste au montage ce n'est probablement pas lui le fautif, vous faites certainement une erreur. Au préalable graisser à l'aide d'une graisse compatible pour l'Oxygène pur[24] tous les O ring et les filets. Il est inutile de serrer les écrous comme des brutes, sinon vous risquez de ne plus pouvoir les défaire sans les casser. Lorsque vous montez les accessoires sur les sacs (Scrubber, by-pass, sonde…) évitez de prendre appuis sur les sacs, ceux-ci sont fragiles, il faut prendre appui sur les bagues des connecteurs.

Si la connexion est bien faite, vous devez entendre le « clic! » du connecteur qui se bloque. Pour déconnecter: il faut appuyer sur le bouton du connecteur et surtout ne pas tirer sur les sacs mais maintenir la bague du connecteur.

### Procédure de montage

1. Monter la bouteille sous la coque et fixer celle-ci à l'aide de la sangle.
2. Monter le détendeur sur la bouteille (au besoin ajuster la position de la bouteille). Veiller à ce que le corps du détendeur ne frotte ou ne vienne pas en butée sur un élément ce qui risque de nuire à l'étanchéité
3. Déposer la coque à plat sur le sol, la partie inférieure devant vous.
4. Monter le sac d'expiration à gauche, D'une part il y a un petit ergo rouge qui doit se placer dans l'orifice ad hoc de la coque (cet orifice est repéré par une pastille rouge) et d'autre part: il faut faire passer le passe cloison dans l'orifice de la coque. Serrer le contre-écrou du passe cloison.
5. Monter le sac d'inspiration, à droite. Procéder de la même manière que pour le sac d'inspiration (l'ergo est de couleur noire). Pour ne pas vous tromper lorsque vous montez le sac, l'orifice pour le by-pass doit être devant vous. Eventuellement connecter la sonde O2 mais ne connectez pas encore le by-pass : il faut d'abord effectuer la mesure de débit (voir paragraphe test)
6. Connecter le Scrubber aux sacs (la pipe rouge à gauche et vers le haut) et faites le glisser dans la coque.
7. Fixer le Scrubber à l'aide du velcro.
8. Monter les tuyaux annelés sur les passes cloisons en respectant le sens de circulation des gaz (code de couleur). Avant de serrer les écrous ajustez la position de l'embout buccal : lorsque les tuyaux annelés pendent devant la machine, l'embout doit être +/- vertical, le verrou vers l'intérieur. Les bagues avec les flèches sont des lests, qui permettent de modifier la flottabilité des tuyaux afin d'assurer une prise en bouche de l'embout. On peut les ajuster en les vissant/dévissant le long des tuyaux annelés.
9. En fonction de votre mesure d'$O_2$, de la $FiO_2$ estimée et de votre planification de plongée connecter la buse sonique la mieux adaptée. N'oubliez surtout pas de mettre les bouchons sur les buses non utilisées.
10. Vérifier le débit de la buse sonique[25]
11. Connecter le by-pass sur le sac d'inspiration, vérifier la bonne tenue des flexibles et la non-présence de plis dans les sacs.
12. Effectuer le test d'étanchéité négatif[26]
13. Gonfler les sacs en ouvrant la bouteille, sans oublier de fermer le verrou de l'embout.
14. Ne surtout pas oublier de refermer la bouteille.
15. Effectuer le test d'étanchéité positif[27]
16. Refermer le rabat de la coque, sans oublier d'enlever le poids qui a servi au test. La fermeture du rabat se fait sacs gonflés pour être certain que le rabat ne va pas gêner le gonflage des sacs durant la plongée.

Certains plongeurs utilisent une méthode légèrement différente qui consiste à monter les

[23] Voir le tome 1 : Nitrox : Gaz mixing and blending
[24] Dräger conseille la « Molykote 111 »
[25] Voir la procédure dans le paragraphe Test de la machine -Mesure de débit.
[26] Voir la procédure dans le paragraphe Test de la machine – Test étanchéité négatif
[27] Voir la procédure dans le paragraphe Test de la machine – Test étanchéité positif

sacs sur le scrubber puis glisser l'ensemble dans la coque.

## Test et mesure de configuration de la machine

On ne le répètera jamais assez, ces tests sont vitaux. L'immense majorité des « Recycleux » qui ont eu des accidents graves ou qui ont perdu la vie ont eu leur accident pour avoir négligér d'effectuer les tests sur la machine ou par négligence au montage.

### Vérification du débit de la buse sonique.

Cette mesure vous permet d'une part de vous assurer du bon fonctionnement de la buse sonique, de vous assurer que celle ci n'est pas bouchée et d'autre part cette mesure vous permet d'affiner le calcul de la FiO2. La tuyère d'une buse sonique est trop délicate que pour faire une confiance aveugle sur le marquage du débit sans faire une mesure. Certains auteurs indiquent une manière empirique pour vérifier le débit en mesurant le temps de remplissage du sac d'inspiration. Je suis totalement adversaire de cette méthode car trop peu précise. Si on n'a pas les outils pour mettre sa machine en état et la vérifier : une seule solution évidente de bon sens s'impose… On ne plonge pas au recycleur.

***Procédure de mesure.***

1. Connecter le débitmètre au by-pass, à l'orifice de connexion sur le sac inspiratoire. Le débitmètre doit être horizontal.
2. Ouvrir délicatement la bouteille en redressant le débitmètre à la verticale.
3. Effectuer la mesure et noter celle-ci.
4. Fermer la bouteille
5. Retour au point 10 du montage dans la coque.

## Les tests d'étanchéités.

Ces tests sont à effectuer au montage de la machine et si on transporte la machine montée avant de plonger, il convient de refaire les tests avant de s'équiper. Il y a deux tests à effectuer le test d'étanchéité positif ou de surpression et le test d'étanchéité négatif ou de dépression. Test d'étanchéité négatif. Ce test a pour but de vérifier la bonne tenue des joints, membranes et clapets.

***Procédure***

1. Ouvrir le rabat
2. Aspirer tout l'air contenu dans les sacs tout en pinçant les tuyaux annelés, il faut entendre le bruit que fait la membrane du by-pass lorsqu'elle écrase la fourchette.
3. Vérifier au travers des trous du by-pass que la membrane est bien enfoncée.
4. Vérifier durant une minute ou deux que les tuyaux annelés restent bien racrapotés.

5. Procéder au test positif.

### Test d'étanchéité positif

Il peut se faire de deux manières : soit au gonflage des sacs à la bouche; soit: au gonflage des sacs avec la bouteille. Ce test a pour but de vérifier l'étanchéité complète de la machine.

***Procédure***

1. Fermeture de la soupape de surpression, rabat ouvert.
2. Gonflage des sacs : si on gonfle les sacs à la bouche, il ne faut pas oublier de fermer le verrou. Si on gonfle à la bouteille, il faut vérifier la fermeture du verrou et ne surtout pas oublier de fermer la bouteille dès que les sacs sont gonflés.
3. Poser un poids d'environ 1 kg sur le sac d'inspiration durant 5 minutes et vérifier qu'il ne se dégonfle pas.

4. Retirer le poids et refermer le rabat et tant que les sacs sont . La fermeture du rabat se fait sacs gonflés pour être certain que le rabat ne gêne pas le gonflage des sacs durant la plongée

## Lestage de la machine

Le gilet du Dolphin a une poche au niveau des épaules. Placer +/-2 kg de plomb dans chacune des poches, sans cela il vous sera impossible de maintenir une position horizontale. La flottabilité des sacs vous ferait basculer en position verticale.

# Chapitre 3

Physiologie
Prévention des accidents

## Hypercapnie

C'est un accident typique de la plongée en recycleur elle est due à un excès de $CO_2$. La $PPCO_2$ doit rester inférieure à 50 millibars (40mm Hg) Au-delà, des symptômes pouvant aller jusqu'à la perte de conscience vont apparaître. L'hypercapnie favorise la narcose et les risques d'ADD

Causes

- Buse sonique bouchée (mesure de débit négligée)
- Effort exagéré qui se transforme en essoufflement
- Mauvais remplissage du Scrubber (négligence dans le remplissage)
- Chaux sodée saturée (oubli de noter la durée d'utilisation du produit)
- Oubli de mettre de la chaux dans le Scrubber
- Bouteille non ouverte
- Chaux sodée non adaptée au Scrubber.
- Erreur de mesure de la concentration d'oxygène dans la bouteille.

### Prévention

- Etre attentif et rigoureux lors du montage de la machine et ne pas oublier les tests.

### Symptômes

- Effets sur les capacités cérébrales : troubles des capacités de concentration, somnolence, narcose hypercapnique,
- Fatigue.
- Sueurs froides, sensation d'angoisse.
- Essoufflement, maux de tête.
- Nausées, vomissement.
- Perte de conscience.

### Conduite à tenir.

1. Fermer le verrou de l'embout.
2. Passer sur bailout.
3. Entamer immédiatement la remontée (Abort the dive)
4. Prolonger les paliers peu profonds

## Hypoxie

On parle d'hypoxie lorsque la quantité d'oxygène délivrée aux tissus est insuffisante par rapport aux besoins cellulaires. On considère que l'on est dans une zone hypoxique lorsque la $PPO_2$ est inférieure à 0,16 bars et on parle d'anoxie lorsque cette pression chute en dessous de 0,1 bars.

### Causes

- Buse sonique bouchée (mesure de débit négligée)
- Effort exagéré, consommation métabolique plus importante que prévue.
- Mauvaise estimation de la consommation métabolique.
- Erreur de calcul de la FiO2.
- Erreur de mesure de la concentration d'oxygène dans la bouteille.
- Bouteille non ouverte

### Prévention

- Etre attentif et rigoureux lors du montage de la machine et ne pas oublier les tests.
- Avoir une mesure de $PPO_2$
- Vérifier régulièrement la $PPO_2$

### Symptômes

- Baisse des performances intellectuelles : troubles de mémoire.
- Augmentation de la fréquence respiratoire et cardiaque.
- Trouble de la respiration.
- Etourdissement, vertiges.
- Maux de tête.
- Perte de connaissance.

### Conduite à tenir.

1. Fermer le verrou de l'embout.
2. Passer sur bailout.
3. Entamer immédiatement la remontée (Abort the dive) .
4. Prolonger les paliers peu profonds.

## Hyperoxie[28]

C'est le contraire de l'hypoxie, il s'agit d'un excès d'oxygène. Il est communément admis que la PPO2 maximum en plongée est de 1,6 bars. Le DAN préconise une PPO2 sur le fond de 1,4 bars.

### Causes

- Profondeur plus importante que la profondeur planifiée.
- Erreur de mesure de la concentration d'oxygène dans la bouteille.

### Prévention

- Etre attentif et rigoureux dans les mesures.
- Se tenir au planning initial de plongée.
- Avoir une mesure de $PPO_2$
- Vérifier régulièrement la $PPO_2$

### Symptômes

- Tremblements.
- Troubles visuel, vertiges.
- Convulsions.

### Conduite à tenir.

- Remonter pour réduire la $PPO_2$

## Ingestion de « soupe caustique »

Il s'agit de l'ingestion d'un mélange d'eau et de chaux sodée. Avec les conceptions modernes des scrubber (chicanes…) cet accident n'est pratiquement plus possible.

### Causes

- Noyage du circuit.
- Mauvaise conception du Scrubber ou Scrubber bricolé.
- Négligence dans le remplissage du Scrubber.
- Chaux sodée qui voyage dans la boucle de recyclage.

### Prévention

- Etre attentif et rigoureux lors du montage de la machine et ne pas oublier les tests.

### Symptômes

- Brûlure des voies digestives supérieures (la soupe caustique est neutralisée par l'acide gastrique).

### Conduite à tenir.

- Interrompre la plongée.
- Faire boire de l'eau vinaigrée pour neutraliser la soupe caustique (base)[29].
- Evacuation vers l'hôpital le plus proche.
- O2 si difficultés respiratoires.
- Surtout ne PAS faire vomir.

## Brûlure caustique en préparant le Scrubber

Il s'agit de brûlure occasionnée par le contact avec la peau humide ou les yeux de la chaux sodée.

### Prévention

- Ne pas remplir le Scrubber en milieu naturel face au vent.
- Eviter d'avoir les mains humides.

### Conduite à tenir.

- Rincer abondamment les parties touchées à l'eau.
- Consulter un médecin ou un ophtalmologue.

**DAN Europe**

Hot line :
+39 06 42118685

[28] Pour les détails voir l'ouvrage Nitrox, gaz mixing and blending.

[29] Vieux truc militaire

# Chapitre 4

Calcul
Bailout
Description générale
Contexte d'utilisation

## Détermination du « Best Mix »

Le « Best Mix » c'est à dire le mélange dont la fraction d'oxygène permet d'optimaliser au mieux la décompression sans avoir une PPO2 ou un CNS excessif. La bouteille source est chargée avec ce mélange. En appliquant la loi de Dalton il vient :

**FsO2 = PPO2 / [(P/10) +1]** (1)

Avec :
FsO2 Fraction d'oxygène du « Best Mix »
PPO2 Pression partielle d'oxygène autorisé, maximum 1,6 le NOAA et le DAN préconisent de ne pas dépasser 1,4 bars
P Profondeur en mètres.

Exemple : Déterminer le Best Mix pour une plongée à 30m en acceptant une pression maximale en oxygène de 1,5 bars.
Données : P = 30m PPO2 = 1,5
Résolution : FsO2 = 1,5 / [(30/10) +1] = 0,375 soit un Nx38

## Calcul de la fraction d'oxygène dans la boucle des recycleurs en mode actif.

Valable pour les recycleurs Dräger Dolphin, Dräger Ray, Azimut.
Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents dans ce type de machine d'une part un mélange ayant une quantité fixe d'oxygène est injecté en permanence dans la boucle de recyclage à un débit constant. D'autre part nous consommons une partie de l'oxygène pour assurer notre métabolisme, consommation variable suivant notre activité. La quantité d'oxygène dans la boucle sera donc inférieure à la quantité d'oxygène dans la bouteille. En appliquant les lois de la mécanique des fluides il vient :

**FiO2=[(Qs x FsO2) – VO2] / (Qs – VO2)** (2a)

Corollaire
**Qs=[VO2 x (1 – FiO2)] / (FSO2 – FiO2)** (2b)

Avec :
FIO2 Fraction d'oxygène dans la boucle
Qs Débit de la buse sonique (lt / min)
FsO2 Fraction d'O2 de la bouteille
VO2 Consommation métabolique (lt / min)

Exemple 1 : un plongeur effectue une ballade avec un recycleur Dräger Dolphin. Lors des tests il a mesuré un % d'O2 dans sa bouteille de 38% et un débit de 10 litres/minute de la buse sonique.
Déterminer la fraction d'oxygène dans la boucle

Données :
Qs = 10 FsO2= 0,38 VO2 =1,5
Résolution :
FIO2 = [(10 x 0,38) – 1,5] / (10 – 1,5) = 2,3 / 8,5 = 0,27 soit 27%

## La consommation métabolique d'oxygène.

C'est la quantité d'oxygène que notre organisme à besoin pour assurer son fonctionnement. Cette quantité est variable d'un individu à l'autre, elle dépend de la corpulence, de la forme physique, de l'entraînement et de l'activité exercée en plongée. Le débit métabolique (VO2) est exprimé en litre/minute.

En moyenne on peut considérer :

| Activité | Style d'activité | VO2 |
|---|---|---|
| Repos | Sans activité<br>Sommeil | 0,3 |
| Faible | Plongée statique<br>Photographie…. | 0,5 à 0,75 |
| Moyenne | Ballade<br>Palmage moyen | 1 à 1,5 |
| Forte | Palmage intense<br>Courant, travail | 1,75 à 2,5 |

Exemple 2 : Déterminer le débit minimum de la buse sonique pour une consommation métabolique de 2 litres par minute et de manière à avoir au moins une fraction d'oxygène dans la boucle de 0,21.

Données :
VO2 = 2 FIO2 = 0,21 FSO2 = 0,4

Résolution
Qs = [2 x (1 – 0,21)] / (0,4 – 0,21) = 8,3 litres / minutes

## Détermination du débit minimum de la buse sonique.

En appliquant la formule (2a) et en considérant que la fraction d oxygène dans la boucle ne peut pas être inférieure à 0,21 et que la consommation métabolique est de maximum 2,5 litres par minutes ont peut établir la relation pratique suivante.

**Qs = 200 / (Nx – 21)** (3)

Avec :
Nx Pourcentage d'O2 de la source

Exemple : déterminer pratiquement la buse sonique pour l'utilisation des Nx 32, 36, 40, 50, 60, 80

| Nx | Buse sonique |
|---|---|
| 32 | 18 litres/minute |
| 36 | 13 litres/minute |
| 40 | 10,5 litres/minute |
| 50 | 7 litres/minute |
| 60 | 5,5 litres/minute |
| 80 | 3,5 litres/minute |

## Calcul de la fraction d'oxygène dans la boucle des recycleurs en mode passif.

Valable pour les recycleurs DC55, RI 2000
Dans ce type d'appareil une partie des gaz respirés est rejetée dans l'eau à chaque respiration du plongeur. C'est la chute de volume de gaz dans la boucle qui provoque l'admission de gaz frais. Le volume de gaz injecté dans la boucle est proportionnel à la pression hydrostatique. Ce qui revient à dire que la fraction d'oxygène injectée est proportionnelle à la profondeur. En appliquant les lois de la mécanique des fluides et de la physique il vient :

$$FIO2=1-\{(1-FSO2) \times [(P + (\xi \times \lambda)) / (P \times \lambda)]\} \quad (4)$$

En posant :

$\xi = V_I / V_E$
$\lambda = (21 - V_{LO})/100$

Pour connaître sont $V_{LO}$ c'est très simple il suffit d'expirer lentement dans son oxymétre et de lire la valeur affichée.

Avec :
FIO2 Fraction d'oxygène dans la boucle
FsO2 Concentration en oxygène de la source (bouteille de Nitrox)
P Pression ambiante absolue.
$V_I$ Volume du sac d'inspiration
$V_E$ Volume du sac d'expiration
$V_{LO}$ Reliquat d'oxygène expiré
$\xi$ Rapport constructif de la machine variant entre 10 et 15
$\lambda$ Coefficient métabolique varie entre 0,03 et 0,06

## Calcul de la durée maximum d'utilisation de la chaux

Pour faire simple comme rien ne se perd et rien ne se crée: on peut considérer que pour chaque litre d'oxygène que notre organisme brûle nous rejetons un litre de CO2. La difficulté réside dans le fait que notre consommation métabolique est fortement variable. De surcroît le rendement des réactions chimiques dépent non seulement du design du scrubber mais aussi des conditions de réaction : vitesse des gaz, pression, degré de saturation de la chaux, température. Elle dépens de la chaux elle-même : Granulométrie, forme des granules… Et facteur aggravant à l'heure actuelle il n'existe aucune sonde économiquement fiable qui permet la mesure du degré de saturation de la chaux sodée. Il n'est donc pas possible de donner une formule précise. Le constructeur estime qu'il est possible de plonger durant 90 minutes avec un kilo de chaux sodée.

Nous pouvons donc établir une formule simple et même simpliste :

$$T_{uc} = (Cs \times 90) / (1 + \Psi) \quad (5)$$

Avec :
$T_{uc}$ temps d'utilisation de la chaux
Cs Capacité du Scrubber en kilo
$\Psi$ Coefficient de sécurité (0,15….0,25)
Pour le Dolphin si on adopte : $\Psi$=0,15 comme la capacité du Scrubber est de 2,25 kg on trouve un $T_{uc}$ de 176 minutes ce qui est très proche des données techniques du Dolphin (180 minutes)

La marine américaine (US Navy Diving Manual Revision 4, 20. Januar 1999) estime que pour un plongeur exécutant un travail léger à lourd, la consommation d'oxygène et donc la production de CO2 est de l'ordre de 1,7 à 2,5 litres par minute. Raisonnablement pour notre balade nous devrons en moyenne produire 1 à 1,5 litres par minute de CO2.
Une autre manière de calculer est de connaître sa consommation moyenne en circuit ouvert. Comme nous consommons en moyenne 6 % du gaz que nous respirons notre production de CO2 pour une consommation de 20 litres/minute en circuit ouvert sera de 1,2 litres de CO2 .

## Estimation de sa consommation métabolique

Il est possible avec quelques mesures simples en plongée d'estimer sa consommation métabolique à l'aide de l' oxygauge et de son profondimètre. Il suffit de noter la profondeur et la mesure de PPO2 indiqée, de réduire cette valeur à la pression atmosphérique pour retrouver la FIO2. Par la suite il est simple de calculer sa consommation métabolique (VO2)

**VO2 = [Qs x (FIO2 – FsO2)] / (FIO2 – 1)** (6)

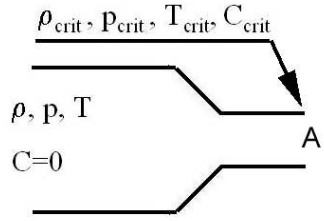
Avec :

| | |
|---|---|
| Qs | Débit de la buse sonique en litres/minute |
| FsO2 | Concentration en oxygène de la source (bouteille de Nitrox) |
| VO2 | Consommation métabolique en litres/minute |
| FIO2 | Fraction d'oxygène dans la boucle. |

Exemple :Nx 40 Buse sonique 10 litre/minute

| Prof. | PPO2 | P | Fi02 | VO2 |
|---|---|---|---|---|
| 10m | 0,7 | 2 bars | 0,35 | 0,76 |
| 20m | 0,9 | 3 bars | 0,3 | 1,43 |
| 30m | 1,0 | 4 bars | 0,25 | 2 |

## Calcul de la pression, de la température, de la vitesse, de la masse volumique à la sortie de la buse sonique, du débit et du coefficient adiabatique




Les busettes soniques sont des tuyères dans lesquelles de part leurs dimensions et leur matériau constructif on peut considérer que les gaz ne subissent q' une détende adiabatique. La mécanique des fluides compressibles nous apprend que le débit massique d'une tuyère reste constant si la pression avale est au moins égale à la pression critique. La vitesse de sortie des gaz correspond à un nombre de Mach égal à un (vitesse du son dans le milieu considéré)

Soit les valeurs[30]:

| | |
|---|---|
| $\chi$ | Rapport de pression critique |
| k | Constante adiabatique des gaz |
| $p_{crit}$ | Pression critique |
| p | Pression en amont de la tuyère |
| $T_{crit}$ | Température critique |
| T | Température en amont de la tuyère |
| $C_{crit}$ | Vitesse des gaz à la sortie de la tuyère |
| $\rho$ | Masse volumique du gaz en amont |
| $\rho_{crit}$ | Masse volumique du gaz à la sortie de la tuyère |
| R | Constante des gaz parfait |
| $\mu$ | Masse molaire du gaz |
| $Q_{mas}$ | Débit massique maximum |
| $Q_{vol}$ | Débit volumique = Qmas / $\rho_{crit}$ |
| A | Section à la sortie de la buse sonique |

$$\chi = [2 / (k + 1)]^{[k / (k - 1)]} \quad (7a)$$
$$p_{crit} = \chi \times p \quad (7b)$$
$$T_{crit} = 2T/(k+1) \quad (7c)$$
$$C_{crit} = (\mu R k T_{crit})^{0,5} \quad (7d)$$
$$\rho_{crit} = \rho [2 / (k + 1)]^{[1 / (k - 1)]} \quad (7e)$$
$$Q_{mas} = A \rho_{crit} C_{crit} \quad (7f)$$

En appliquant la formule (7) qui définissent l'état du gaz il vient que si du Nitrox circule dans la buse sonique le rapport de pression critique est de 0,53

Pour les mélanges la valeur de k est donnée par la relation

$$k = \sum k_i [\%]_i \quad (8)$$

[%] étant le % de chaque constituant du mélange.

Exemple : Quel est la valeur de k pour un mélange contenant 20% d'Oxygène, 30% d'azote et 50% d'hélium.

K = (0,2x1,416)+(0,3x1,404)+(0,5x1,63)=1,519

[30] Les valeurs de k, R, $\mu$ sont données à la page 35 dans les annexes.

## Calcul de la profondeur maximale « mécanique » d'utilisation.

Maintenant que nous avons déterminé les conditions de fonctionnent de la buse sonique, il est facile de déterminer en fonction de la pression délivrée par le détendeur la profondeur maximale de d'utilisation de la machine. En effet le débit massique de la buse sonique doit rester contant, ce qui implique que la pression ambiante ne peut pas être supérieure à la pression critique. Si la pression ambiante absolue est supérieure à la pression critique, le débit ne reste plus constant. La pression délivrée par le détendeur étant la pression amont.

$$\mathbf{Prof_{max} = [(\chi \times P_{det}) - 1] \times 10} \quad (9)$$

Avec :

$Prof_{max}$ Profondeur maximum théorique de fonctionnement en mètre.

$P_{det}$ Pression du détendeur en bars.

Exemple : Déterminer la profondeur maximale théorique d'utilisation d'un Dräger Ray dont le détendeur délivre un Nitrox à 9 bar.

$Prof_{max} = [(0,53 \times 9) - 1] \times 10 = 38$ mètres

## Calcul de la profondeur maximale « physiologique » d'utilisation.

Par mesure de conservatisme la profondeur maximum d'utilisation est déterminée par la concentration en oxygène de la source, c'est à dire de la bouteille de Nitrox. Cette manière de procéder nous laisse une certaine marge de manœuvre. Il ne faut pas déterminer cette profondeur en fonction de la concentration en oxygène dans la boucle de recyclage pour les raisons suivantes :

- La concentration en oxygène n'est pas connue avec exactitude dans la boucle.
- La concentration en oxygène est variable dans la boucle.
- La concentration en oxygène dans la boucle peut varier rapidement : ouverture du by-pass, modification des conditions de plongée...
- La concentration en oxygène dans la bouteille est toujours supérieure à celle de la boucle, ce qui nous donne une marche de sécurité dans le calcul de la profondeur maximum.
- Cette manière de calculer permet l'utilisation de la source comme bailout.

Le DAN préconise de ne pas dépasser une PPO2 de 1,4 bar sur le fond, la limite maximum tolérée étant de 1,6 bar. Les temps au fond en recycleur pouvant être largement plus importants qu'avec le circuit ouvert. Il est indispensable de vérifier pour chaque plongée si on ne dépasse pas les 75% de CNS[31] préconisé par le NOAA. La vérification du CNS peut se faire très rapidement et avec conservatisme[32] en considérant la concentration d'oxygène au niveau de la source et pas celle de la boucle de recyclage.
De nombreux « recycleux » limitent la ppo2 à 1,3 voire 1,2 pour les CCR car le temps au fond peut être très important.

## Calcul de l'autonomie.

L'autonomie de plongée en recycleur n'est pas liée à la profondeur. Ce concept, pourtant simple à comprendre, est très difficilement perçu par les « non recycleux ». Ceux-ci ayant l'habitude de calculer l'autonomie exclusivement avec la loi de Boyle Mariotte ont tendance à l'appliquer là où elle n'est pas d'application. D'une part comme la plus grande partie des gaz présent dans la machine est recyclée au sein de celle-ci : la loi des gaz parfait ne va s'appliquer, lors de la descente, qu'a un volume réduit de gaz (sac inspiratoire)[33]. D'autre part, la buse sonique délivre un poids de gaz constant dans l'unité de temps [34]quelque soit la profondeur, la loi des gaz parfaits ne s'applique donc pas. Dans bien des cas l'autonomie sera donnée non pas par la quantité de gaz emporté mais par la quantité de chaux sodée[35] .
Comparons l'autonomie d'un circuit ouvert avec un SCR. Les deux appareils ayant une bouteille de 10 litres à 200 bars, le plongeur consomme 15 litres de gaz par minute en circuit ouvert et on utilise la buse EAN 32 pour le recycleur. Cette buse délivrant 19,4 grammes de gaz par minutes ou 15 litres de gaz normobar par minute .

| Prof m | P bar | Circuit ouvert | | SCR | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Co lt/min | Aut min | Sac[36] lt | Cs[37] gr/min | Aut min |
| 0 | 1 | 15 | 133 | 5 | 19, 4 | 133 |
| 10 | 2 | 30 | 67 | 10 | 19, 4 | 133 |
| 20 | 3 | 45 | 44 | 15 | 19, 4 | 132 |
| 30 | 4 | 60 | 33 | 20 | 19, 4 | 131 |
| 40 | 5 | 75 | 27 | 25 | 19, 4 | 131 |

Avec :

Prof Profondeur en mètres

[31] Voir le cours Nitrox, Gaz mixing and Blending
[32] C'est la méthode que je préconise.
[33] Voir fonctionnement et rôle du by-pass
[34] Constance du débit massique.
[35] C'est systématiquement le cas pour les CCR
[36] Quantité de gaz utilisé dans le sac inspiratoire
[37] Buse sonique marquée 15 litres/minute

P Pression absolue en Bars
Co Consommation en litres/minute
Aut Autonomie en minutes
Cs Consommation en grammes/minute

On constate que vis à vis de la capacité de la bouteille la quantité de gaz utilisée dans les sacs est négligeable. On peut déduire la formule :

**Aut = (Vb x (Pb – Pr)) / Qs** (10)

Avec :
Aut Autonomie de la réserve de gaz en minutes
Vb Volume hydraulique de la bouteille en litres
Pb Pression de gonflage de la bouteille en bars
Pr Pression de réserve de sécurité… généralement on adopte 25 bars
Qs Débit mesuré de la buse sonique en litres / minute

Exemple : On utilise un Dolphin dans sa configuration classique : bouteille de 5 litres gonflée à 200 bars, avec un débit de buse mesurée de 11 litres/ minute. Quelle est l'autonomie de la machine ?

Données :
Vb =5 litres Pb=200 bars
Pr=25 bars Qs=11 litres/minute
Résolution
Aut = (5 x (200 – 25)) / 11 = 79 minutes

## Détermination du système de bailout

Sous ce vocable barbare se cache une chose toute simple. Le bailout est un système de sécurité qui doit permettre à un plongeur de remonter et faire ses paliers seul et sans aucune aide extérieure. Dans l'immense majorité des configurations, le bailout est constitué d'un circuit ouvert. La conception du bailout peut être très complexe et dépent du style de plongée. Nous n'aborderons dans ce paragraphe que la conception du bailout pour l'utilisation d'un SCR limité à une profondeur de 40m et pour des plongées ayant un accès libre à la surface. La conception du bailout pour les plongées sous voûtes étant trop spécifique. Le bailout doit être prévu pour palier à un accident maximum majeur sur la boucle de recyclage (noyage de la boucle) juste au moment de la remontée. Les mélanges dans le bailout doivent être respirables quelle que soit la profondeur. Le passage sur bailout implique la fin de la plongée et la remontée. Il faut essayer d'avoir un bailout avec une flottabilité aussi neutre que possible pour ne pas devoir ajuster son lestage à chaque modification.

### Bailout minimaliste

Dräger fourni avec le Dolphin une bouteille de 2lt à 200 bars, cette bouteille peu servir de bailout pour des plongées très peu profondes et sans paliers. La capacité de la bouteille étant encore réduite par le fait que celle-ci sert aussi à gonfler le gilet et le costume. En considérant que 50 bars sont utilisés pour la gestion du gilet et du costume et qu'il faut une réserve de 20 bars en surface pour palier assurer la flottabilité il reste 130 bars ou 260 litres d'air pour faire la remontée et un palier de sécurité. C'est vraiment peu !

| Profondeur | Pression | | | Consommation | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Absolue | Moyenne | Remontée | Remontée | Paliers | Totale |
| 10m | 2 bars | 1,5 bars | 1 min | 30 litres | 90 litres | 110 litres |
| 20m | 3 bars | 2 bars | 2 min | 80 litres | 90 litres | 170 litres |
| 30m | 4 bars | 2,5 bars | 3 min | 150 litres | 90 litres | 240 litres |
| 40m | 5 bars | 3 bars | 4 min | 240 litres | 90 litres | 330 litres |

On constate sur le tableau ci dessus qu'avec ce système il n'est pas possible de faire un palier de sécurité si la profondeur dépasse 20 à 30m

### Bailout léger et économique

Une solution légère et économique consiste à monter une bouteille de capacité plus grande (8 à 10 litres) à la place de la bouteille originale. Mettre un robinet double sortie et monter sur la deuxième sortie un détendeur en circuit ouvert[38]. Il faut considérer que la moitié de la bouteille peut servir de bailout. Cette solution a néanmoins un petit défaut même si la boucle de recyclage et le bailout sont totalement séparées, le bailout n'est pas totalement indépendant.

[38] C'est la configuration que j'adopte pour la mer du Nord et la Zélande.

## Bailout indépendant.

C'est la solution la plus sure : le bailout est totalement indépendant du recycleur. Il faut que le détendeur soit facilement accessible et sa position bien connue pour pouvoir y accéder sans hésitations même avec une visibilité nulle. Le flexible du détendeur est maintenu par deux élastiques, et est lové sur la bouteille de manière à pouvoir être délové facilement. La bouteille est fixée sur le gilet par des mousquetons sous le bras gauche, le détendeur se trouvant au niveau de la poitrine. Une autre manière pour fixer un bailout de petite taille consiste à le fixer transversalement sur le ventre. Le détendeur étant fixé de la même manière que précédemment.

## Détermination de la capacité minimale du bailout.

La capacité du bailout peut s'exprimer à l'aide de la relation :

**Capacité Bailout = (A + B + C) ν** (11)

En posant :

| | |
|---|---|
| **$A = (P/10)+1]\psi\ t1$** | Bailout |
| **$B= (P/20)+1]\psi\ (P/V)$** | Remontée |
| **$C= \Sigma_{1\rightarrow i}[(Pp_i/\ 10\ )+1]\ t_i\ \psi$** | Paliers 3,6…i |

Avec :

| | |
|---|---|
| P | Profondeur en mètre |
| ψ | Consommation standard en litres/minute (20 litres/minute) |
| t1 | Temps entre le passage sur bailout et la remontée (pour sortir d'une épave par exemple…) en minutes : minimum 2 minutes pour analyser le problème et envoyer le parachute |
| V | Vitesse de remontée en mètre/ minute (10 mètres /minute) |
| Ppi | Profondeur des paliers en mètres |
| ti | Durée des paliers en minutes |
| ν | Coefficient de sécurité : minimum 1,25 conseillé 1,5 |

Exemple : on plonge sur une épave à la profondeur de 40m, on doit passer sur bailout dans l'épave après avoir passé 5 minutes dans celle ci. Le run time le plus pessimiste prévoit un palier de 7 minutes à 6m et 24 minutes à 3 mètres quel est le bailout à prévoir ?

Pour les plongeurs fâchés avec les maths il y a moyen de mettre cette relation sous forme de tableau

| **Bouteille = Total / 200**<br>Bouteille = 1985 / 200= 10 litres | | **Profondeur (Prof) (mètres)** | **Temps x Pression x ψ = volume** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | **Temps (t) (minutes)** | **Pression (P) (bars)** | **ψ** | **Volume (litres)** |
| P=(Prof/10) + 1 | Bailout | 40 | 5 | 5 | 20 | 500 |
| t=Prof/10<br>P=(Prof/20) + 1 | Remontée | 40 à 0 | 4 | 3 | 20 | 240 |
| P=(Prof/10) + 1 | Palier 6m | 6 | 7 | 1,6 | 20 | 224 |
| | Palier 3m | 3 | 24 | 1,3 | 20 | 624 |
| | | | | Total sans sécu | | 1588 |
| | | | | Sécurité | | 1,25 |
| | | | | Total | | 1985 |

## Paramétrage et configuration de la machine

Le paramétrage et la configuration des SCR et du Dolphin en particulier sont très simples. Après avoir déterminé le profil de la plongée : temps, profondeur, mélange, buse sonique, on détermine facilement la configuration de la machine et de son bailout. Il suffit de raccorder la bonne buse sonique, faire les tests et préparer le bailout sans oublier les accessoires de fixation sur la machine (mousquetons, ring, sangles…)

## Gestion de la décompression

La gestion de la décompression en CCR et SCR est totalement différente. En CCR la pression partielle d'oxygène est maintenue constante contrairement au SCR ou cette pression varie en permanence. Dans le cadre de cet ouvrage nous n'aborderons que le mode SCR.

### Méthode sécuritaire[39]

C'est la méthode la plus simple, la plus efficace et la plus sécuritaire. Elle vous permet de profiter pleinement de la sécurité accrue

[39] C'est la méthode que je préconise s'il n'est pas possible de faire une gestion électronique.

qu'apporte le Nitrox. Ce n'est pas négligeable dans nos conditions de plongée habituelle qui allient le froid, le courant, le stress lié au manque de visibilité et les efforts physiques avant et après la plongée. Cette méthode consiste tout simplement à gérer la décompression comme si la plongée était faite

à l'air avec des tables, un ordinateur air ou un ordinateur Nitrox réglé sur 21% d'oxygène.

### Méthode agressive[40]

Cette méthode consiste à estimer, de préférence largement, sa consommation métabolique. Déterminer la fraction d'oxygène dans la boucle et utiliser cette valeur pour gérer la décompression en utilisant soit des tables Nitrox, des tables air corrigées ou en programmant un ordinateur Nitrox.

Cette méthode à bien des inconvénients et incertitudes

- Estimation de la fraction d'oxygène : pas une valeur sure, mesurable directement et vérifiée.
- La fraction d'oxygène est fortement variable suivant les conditions de plongée.
- La fraction d'oxygène peut chuter fortement lors de la remontée[41] alors que l'on entame le processus de décompression.

Sans être totalement adversaire de la méthode, je n'en suis pas un partisan convaincu à cause des incertitudes. Il va de soi que si on plonge, à faible profondeur, avec une remontée très lente, avec un Nitrox source fortement oxygéné et que même avec une consommation métabolique élevée (2 – 2,5 litres/minute) il y a une fraction d'oxygène élevé dans la boucle on peut envisager la méthode avec prudence. A chacun de prendre ses responsabilités et comme disent les américains « It's your live »

### Gestion électronique

C'est la gestion la plus ergonomique, à défaut d'être la plus économique. Il faut avoir un ordinateur qui prend en charge la mesure de $PPO_2$ pour effectuer ses calculs de décompression. La mesure de pression partielle d'oxygène est faite par une sonde placée à l'intérieur du sac d'inspiration. Cette méthode efficace de gestion nécessite néanmoins quelques précautions.

- Ne pas oublier de calibrer l'ordinateur à sa première mise en service.
- Vérifier régulièrement le calibrage.
- Les cellules $O_2$ n'ont pas une durée de vie éternelle, il faut les remplacer régulièrement. Les constructeurs conseillent un remplacement annuel.
- Prévoir un système de gestion de décompression alternatif en cas de défaillance du système.
- Prévoir un calcul de décompression alternatif en cas de passage sur bailout. En cas de passage sur bailout la mesure de la pression partielle d'oxygène n'est plus la valeur réelle.

## Planification de la plongée

Dans ce paragraphe nous n'allons pas passer en revue tous les détails de la planification, qui sont connus depuis les premiers niveaux et la formation Nitrox. Nous aborderons uniquement les points relatifs à la planification spécifique à l'utilisation des SCR. Connaissant la profondeur et la durée de la plongée nous pouvons établir la procédure suivante.

### Procédure de planification.

1. Calculer le Best-Mix, gaz de la source.
2. Déterminer le débit de la buse sonique à utiliser.
3. Déterminer la procédure de décompression (table, soft, ordinateur…) sans oublier un plan de secours en cas de perte totale de l'électronique et un passage sur bailout juste au moment de la remontée.
4. Vérifier l'autonomie de la machine.
5. Vérifier si pour le plan le plus pessimiste la valeur du CNS n'est pas trop importante.
6. Calculer le bailout.

Exemple :

On fait une plongée en Zélande à une profondeur de 33 m durant 35 minutes avec un Dräger Dolphin. La remontée verticale n'étant pas possible à cause d'un chenal de navigation, on estime à 3 minutes le temps qu'il faille en cas de passage sur bailout pour se sortir de la zone dangereuse et remonter. Déterminer la fiche de planification complète.

Le marquage du scrubber indique que la chaux à été utilisée durant 70 minutes.

[40] J'en parle uniquement car certains ouvrages y font référence… Je suis très adversaire de cette méthode.

[41] Ce phénomène sera expliqué dans le chapitre suivant dans le paragraphe des procédures de plongée

***Données***
Profondeur : 33 m
Durée : 35 minutes
Temps Bailout : 3 minutes
Chaux : utilisée durant 70 minutes

***Choix des tables***
Nous optons pour la table US Navy 1993. Utilisée avec la méthode sécuritaire de gestion de la décompression.

***Calcul des paliers*** : la table donne
Palier : 6 m 2 minutes
3 m 21 minutes
La durée d'utilisation de la machine sera d'environ 65 minutes

***Calcul du Best Mix :***
Best Mix : 1,5 / [(33/10) +1] = 0,35
soit un Nx35

***Détermination de la buse sonique***
Débit: 200 /(35-21) = 14, 28 litres/minute

***Sélection de la buse sonique***
EAN 32 (15 litres/minutes)

***Calcul de l'autonomie***
*1)Gaz*
Quantité de gaz utilisé : 65x15 = 975 litres

La bouteille de 5 litres (1000 litres de mélange) étant trop juste nous optons pour une bouteille de 7 litres gonflée à 220 bars soit : 220x7= 1540 litres
Sécurité : 1540 –975 = 565 litres ou 80 bars (largement suffisant)

*2) Chaux*
Utilisation de la chaux : 65 minutes
Déjà utilisée : 70 minutes
Durée totale d'utilisation : 135 minutes
Ce qui est inférieur à 180 minutes donnée par le constructeur.

***Fraction d'Oxygène dans la boucle***
Métabolisme estimé : 1,5 litres/minute
FiO2 = 24,5

***Vérification du CNS***
CNS[42] : +/- 40 %

***Détermination du bailout***

| **Bouteille = Total / 200**<br>Bouteille = 1283 / 200= 7 litres | | **Profondeur (Prof) (mètres)** | **Temps x Pression x ψ = volume** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | **Temps (t) (minutes)** | **Pression (P) (bars)** | **ψ** | **Volume (litres)** |
| P=(Prof/10) + 1 | Bailout | 33 | 3 | 4,3 | 20 | 258 |
| t=Prof/10<br>P=(Prof/20) + 1 | Remontée | 33 à 0 | 3 | 2,65 | 20 | 159 |
| P=(Prof/10) + 1 | Palier 6m | 6 | 2 | 1,6 | 20 | 64 |
| | Palier 3m | 3 | 21 | 1,3 | 20 | 546 |
| | | | | Total sans sécu | | 1027 |
| | | | | Sécurité | | 1,25 |
| | | | | Total | | 1283 |

## Procédure de plongée

### Mise à l'eau

Contrairement aux circuits ouverts les SCR consomment dès l'ouverture de la bouteille. Il ne faut donc n'ouvrir la bouteille que juste avant de se mettre à l'eau. Tant que l'on ne respire pas sur la machine, le verrou de l'embout doit être fermé. Dans le cas contraire, surtout si la bouteille est fermée, c'est le noyage de la boucle de recyclage assuré. Pour que les réactions chimiques s'amorcent dans le Scrubber, il faut un minimum d'humidité, celle ci est donnée par la respiration. Le maximum de rendement des réactions ne s'obtient qu'après trois ou quatre

Plonger en recycleur, c'est laisser les habitudes acquises en circuit ouvert au bord de l'eau…

[42] Voir cours Nitrox

cycles de respiration qui seront faîtes en surface. Il faut au moins une minute entre l'ouverture du bloc et l'immersion pour établir la pression dans la boucle.

***Procédure de mise à l'eau en surface.***

1. Vérifier si le verrou de l'embout est fermé
2. Ouvrir la bouteille
3. Expirer à fond, pour éviter d'injecter inutilement du CO2 dans le circuit
4. Mettre l'embout buccal en bouche
5. Ouvrir le verrou de l'embout buccal
6. Faire 3 – 4 cycles respiratoires pour amorcer les réactions avant de s'immerger.

## Descente

Les recycleurs ne sont pas des machines destinées à respirer en surface, il n'est pas rare qu'au début de la plongée vous ayez l'impression d'un manque d'air. Cette impression va s'estomper dans les deux trois

premiers mètres de la descente. Ce n'est pas parce qu'on plonge en recycleur que tous les principes de la plongée doivent être oublier. Pour éviter le placage, Il faudra bien sur équilibrer la cuve du masque en soufflant par le nez, mais il faut essayer de limiter la consommation de gaz en effet une vidange complète du masque fait perdre entre deux et quatre minutes d'autonomie.

***Procédure de descente***

1. Descendre à 5 mètres et se stabiliser.
2. Effectuer le « bubble check » avec le buddy : vérifier si des bulles suspectes sortent de la machine, soyez attentifs aux bruits suspects et à une modification anormale de la flottabilité.
3. Après validation du test vous pouvez continuer la descente.

## Déplacement horizontaux

Ce qui frappe le plus le plongeur qui passe du circuit ouvert au recycleur c'est l'absence totale de poumon-ballast. Ce qui est tout à fait logique puisque les sacs et les poumons sont vidés et remplis alternativement sans modification du volume global machine - poumons. Sans lestage au niveau des épaules il vous sera difficile de maintenir une position horizontale, si vous éprouvez des difficultés à maintenir cette position il faut augmenter le lestage. Autre point important sur nos sites de plongée où la visibilité est loin d'être « méditerranéenne » c'est l'absence de bulles, il faut être nettement plus attentif pour éviter de perdre son buddy. En circuit ouvert on vous a appris à surveiller vos paramètres de plongée, en recycleur si vous avez un paramètre supplémentaire à surveiller c'est la pression partielle d'oxygène. L'utilisation d'une jauge, même si elle n'est pas obligatoire, est fortement conseillé.

## Remontée

La remontée que ce soit en recycleur ou en circuit ouvert est toujours la partie la plus délicate de la plongée. Dans le cas des SCR la gestion de la remontée est un peu plus délicate qu'en circuit ouvert. Lors de la remontée, la pression ambiante diminuant, les sacs vont augmenter de volume et la pression augmenter jusqu'à l'ouverture de la soupape de sécurité. L'augmentation de volume des sacs risque d'augmenter la vitesse de remontée. Pour contrer ce phénomène, aggravé par le débit constant de la buse sonique, il suffit d'expirer par le nez ce qui aura pour effet de vider en partie les sacs. Un autre avantage de quelques expirations à la remontée est de « rincer » les sacs avec un mélange frais riche en oxygène, alors que la pression diminue, ce qui va contribuer à maintenir une PPO2 dans des normes acceptables ce qui n'est pas plus mal pour la décompression.

## Conduite à tenir en cas d' urgence.

Le point le plus important : l'analyse détaillée d'un problème ou d'une panne ne se fait jamais en plongée mais en surface. Que ce soit un problème mécanique sur le recycleur, un problème physiologique : maux de tête, vertiges, nausées…, une lecture de PPO2 hors des valeurs acceptables. Bref quel que soit le problème il n'y a qu'une attitude intelligente à avoir : passage sur bail out et fin de plongée (Abort the dive). Pour passer sur bail out il est indispensable de savoir trouver d'une façon instantanée le détendeur de secours et ce même à tâtons sans aucune visibilité. La bouteille de bailout doit être toujours ouverte durant la plongée.

***Procédure de passage sur bailout.***

1. Fermer le verrou de l'embout buccal.
2. Laisser filer les tubes annelés vers le haut.
3. Saisir le détendeur de secours du bailout.

# Chapitre 5

What if
Tableau des pannes

## Le « What if »

Littéralement : Que faire au cas où! Cette philosophie des plongeurs « Tec » est très facile à comprendre, moins facile à mettre en œuvre. Il s'agit de faire une liste, non exhaustive, de tous les problèmes matériels ou non que l'on puisse rencontrer en plongée. On ne plonge que si tous les points ont reçu une réponse satisfaisante. L'aide obligatoire de la part du buddy pour résoudre un problème de la liste n'est pas considérée comme une option valable et doit être rejetée. Le « Recycleux » doit s'inspirer largement de cette manière de voir pour pouvoir résoudre ses problèmes sans aide car la plupart de ses buddy's ne seront pas des « Recycleux ». Il est tout à fait illusoire de vouloir expliquer, en quelques minutes, à des personnes qui ne connaissent pas les recycleurs les conduites à tenir vis à vis d'un « Recycleux ». Virtuellement même en palanquée le « Recycleux » doit être considéré comme seul. Il faut bien sur s'entraîner à la mise en œuvre des solutions imaginées.
Dans les paragraphes suivants nous allons passer en revue les problèmes les plus courants liés aux recycleurs.

## Problèmes au montage et aux tests

Avant de plonger: il faut que la machine soit parfaitement en état.

***Un problème non résolu quel que soit le problème, interdit l'utilisation de la machine.***

### Pré montage de la machine

| | | | |
|---|---|---|---|
| Annelé | Test côté inspiration négatif | | • Vérifier le sens du clapet<br>• Membrane sale ou endommagée<br>• Joints sales ou endommagés |
| | Test côté expiration négatif | | • Vérifier le sens du clapet<br>• Membrane sale ou endommagée<br>• Joints sales ou endommagés |
| Scrubber | Test d'étanchéité négatif | | • Couvercle pas fermé, écrou desserré<br>• Trop de chaux sodée<br>• Joint non mis en place<br>• Joint sale ou détérioré |
| | Test passage d'air | Pas de résistance | • Déflecteur oublié<br>• Scrubber mal chargé ( pas vibrer)<br>• Mauvaise granulométrie, grains trop gros |
| | | Trop de résistance | • Mauvaise granulométrie, grains trop petits<br>• Tamis bouchés<br>• Chaux sodée trempée, formant des grumeaux |

## Montage de la machine

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Fuite au niveau du détendeur | | | • Ecrou mal serré, le corps du détendeur frotte sur un élément de la machine.<br>• Joint « O » Ring | |
| Buse sonique | Débit trop faible | Sur une buse | Buse obstruée | Remplacement |
| | | Sur toutes les buses | Moyenne pression | Fuite détendeur |
| | | | | Fuite tuyauterie |
| | | | | Fuite au couvercle de by-pass |
| | | | | Membrane du by-pass percée |
| | | | | Joints « O » ring |
| | Débit trop fort | By-pass débite | Fourchette trop haute | Régler la fourchette |
| | | MP trop élevée | Détendeur déréglé | Régler le détendeur |
| Test positif non concluant | Fuite dans le circuit | Embout buccal mal fermé | | Fermer le verrou |
| | | Bouchons blancs pas en place | | Mettre le(s) bouchon (s) |
| | | Orifice d'un sac ouvert | Mettre le bouchon ou l'accessoire manquant (oxyjauge…) | |
| | | Soupape de sécurité ouverte | Fermer la soupape | |
| | | Fuite dans une connexion | • Elément(s) mal monté (s) pas de « clic » au montage.<br>• « O » ring endommagé, sale ou non graissé. | |
| | | Fuite du joint du Scrubber | Refaire le montage et les tests | |
| | | Fuite au by-pass ou niveau des buses soniques | • Oublier de remettre le capot sur une buse non utilisée.<br>• Oublié de connecter la buse<br>• Joints « O » Ring | |
| | | Fuite au capot du by-pass | • Capot mal vissé.<br>• La rondelle en plastique est montée à l'envers ou on a oublié de la monter ; la bague est mal placée ; la membrane est montée à l'envers.<br>• La membrane est percée. | |
| | | Fuite à la soupape de sécurité | • Membrane pliée, endommagée ou sale<br>• Ressort détaré | |
| Test négatif non concluant | Les deux côtés du tuyau annelé ne tiennent pas | | • Verrou de l'embout ouvert.<br>• Tuyau annelé mal connecté à la machine.<br>• Joints du verrou défectueux, sales ou non graissés. | |
| | Le côté inspiration du tuyau annelé ne tient pas | | • Tuyau annelé mal connecté à la machine.<br>• Fuite au niveau des joints de l'embout côté inspiration | |
| | Le côté expiration du tuyau annelé ne tient pas | | • Tuyau annelé mal connecté à la machine.<br>• Fuite au niveau des joints de l'embout côté expiration | |
| | La membrane du by pass ne tient pas. | | • Verrou de l'embout mal fermé.<br>• Capot mal vissé<br>• Oublié de remettre le capot sur une buse non utilisée ou buse desserrée.<br>• Joints des buses soniques sales, défectueux, ou non graissé<br>• Membrane percée<br>• Connecteur MP dévissés<br>• Membrane de la soupape de sécurité non étanche. | |

## Problèmes en immersion

| | | | |
|---|---|---|---|
| Lestage | Votre lestage est correct et vous n'arrivz pas à descendre | Pas de chaux sodée dans la machine | Bailout immédiat |
| | Vous n'arrivez pas à rester horizontal | Lestage d'épaule insuffisant | |
| Flottabilité | La machine prend du poids rapidement | Boucle de recyclage noyée | • Bailout immédiat<br>• Gonfler le gilet |
| | La machine vous remonte, même en dégonflant le gilet. | Soupape bloquée ou débit trop faible. Débit permanent du by-pass | Expirer par le nez pour vider les sacs |
| Bruits | Bruit de « glouglou » permanent | La machine se rempli d'eau | Bailout immédiat |
| | Claquement au niveau de l'embout durant les respirations | Eau dans le tube annelé, probablement à cause d'une membrane de clapet non étanche ou déformée. | Tenter de faire sortir l'eau en secouant la tête de gauche à droite [43] |
| Physiologique | Maux de tête, vertige, nausées, goût bizarre dans la bouche… | Problème chimique, O2, CO2….. | Bailout immédiat |
| Mesure PPO2 | PPO2 > 1,6 | Trop profond<br>Erreur de calcul ou de mesure | Bailout immédiat |
| | PPO2 < 0,21 | Erreur de calcul, ou de mesure<br>Buse sonique bouchée | Bailout immédiat |

**L'indispensable à ne jamais oublier !**

- **La graisse compatible oxygène.**
- **Le débitmètre**
- **Le raccord de gonflage de la bouteille**

[43] Comme à l'époque du Royal Mistral

# Chapitre 6

Démontage
Entretien, rangement
Modifications

## Démontage et rincage

Si vous n'utilisez pas la machine durant un laps de temps important, vous devez la démonter et la rincer. Pour déconnecter les éléments il faut actionner les boutons de libération des ergots de maintien des bagues de connexions sans prendre appui sur les sacs.

### Procédure

1. Démonter les tuyaux annelés et les secouer pour enlever l'eau. Il est conseillé de laisser les écrous sur les tuyaux pour éviter de les perdre.
2. Déconnecter le scrubber des sacs et retirer celui-ci de la machine.
3. Déconnecter et enlever l'oxyjauge
4. Dévisser les contres écrous des passes cloisons et retirer les sacs. Il est conseillé de remonter les contre écrous sur leur sac respectif pour éviter de les perdre.
5. Rincer à l'eau douce tous les éléments qui ont été en contact avec l'eau et l'intérieur des sacs.
6. Faites sécher les éléments à l'abri du soleil, ne pas oublier de retirer les petits bouchons blancs de vidange des sacs et de les placer à l'endroit prévu sur le sac. Pour l'annelé le plus facile est de le pendre verticalement.
7. Le cas échéant si la machine n'est plus utilisée durant un long laps de temps retirer la chaux sodée du scrubber.

### Désinfection

***Souvenez-vous de la maladie des légionnaires !***

Un point très important, surtout si la machine sert à plusieurs personnes. La machine recycle non seulement les gaz mais aussi les bactéries qui tournent en circuit fermé dans un milieu chaud et humide favorable à leur multiplication. Il est donc très important de désinfecter régulièrement la boucle de recyclage en respectant scrupuleusement les concentrations de produit préconisé. La plupart des produits sur le marché sont concentrés et doivent être dilué. A chaque changement d'utilisateur il faut désinfecter la boucle.

## Entretien

Nous n'aborderons dans ce paragraphe que les entretiens courant pouvant être facilement faits par l'utilisateur. Pour plus de détail il faut consulter le manuel technique du constructeur.

| | |
|---|---|
| Après chaque plongée. | Rincer et inspecter visuellement la machine. |
| Après un W.E. plongée | Rincer, désinfecter et inspecter visuellement la machine |
| Mensuel | Graisser les O rings avec de la graisse MOLYKOTE 111 |
| Annuel | • Inspecter les tuyaux<br>• Vérifier les buses soniques<br>• Vérifier la Moyenne pression |
| Tous les 2 ans | • Remplacer les O rings<br>• Remplacer les membranes |
| Tous les 6 ans | Inspection complète par un technicien de la firme. |

## Stockage

La machine doit être rangée et démontée à l'abri de la lumière. Il faut veiller à ne pas solliciter la coque et de ne pas laisser des plis dans les sacs.

## Modification sur la machine.

La machine est conforme aux normes européennes, si vous la modifiez au terme des directives de l'UE vous devenez « constructeur » et vous portez l'entière responsabilité du bon fonctionnement de l'ensemble de la machine et pas seulement de la modification que vous apportez.
Le gilet peut sembler à certain un peu faible en capacité : Dive Rite a dessiné une Wing qui s'adapte parfaitement à la coque du Dolphin.

La modification importante la plus couramment effectué sur le Dräger Dolphin est la transformation en CCR par la méthode KISS de Gordon Smith. Il s'agit de récupérer la mécanique du Dräger : sacs, scrubber… de modifier le circuit d'alimentation en gaz par l'adjonction d'une bouteille de diluent, d'oxygène, des vannes ad hoc et bien sur d'un système de contrôle de PPO2 redondant. C'est totalement un autre concept qui redemande une nouvelle formation.

## Bibliographie


Jacques Vettier -- *Nitrox Trimix* , ed Ulmer 2003
André Houberechts -- *La Thermodynamique Technique*, ed Vander 1975
D Sirven -- *La plongée NITROX*, Technical Diving International France, 1996
D Rutkowski -- *NITROX Manual*, Hyberbaric International, Key Largo, FL. 1989
L Somers -- *Enriched air NITROX diver instructor's manual*, IANTD, Miami, FL. 1992
US Navy Diving Manual
DNAx Denitogenated Air, Advanced Diver, 3, 1999, 49-50
Jean-François André (dit Jeff)—Nitrox et Recycleur, ed Hippoconsulting 2005
Ranald V. Giles -- Mécanique des fluides, ed Schaum 1977

Manuel d'utilisation et technique du SCR Dräger Dolphin


***Les sites :***


http://www.danshop.com/
http://recycleur.free.fr/index.php
http://www.nwdesigns.com/rebreathers/Default.htm
http://home.worldcom.ch/intruder/
http://www.therebreathersite.nl/

# Annexes

Paramètrage du Dräger Dolphin
Propriétés physiques des gaz
Calcul détaillé de la FiO2
Quelques recycleurs
Ordinateurs et accessoires
Feuille de planification
Standard ADIP[44]

[44] L'ADIP est le représentant francophone pour la Belgique du CEDIP (Comité Européen Des Instucteurs de Plongée)

## Paramètrage du Dolphin

En fonction du Nitrox source utilisé et du débit de la buse sonique (litres/minutes), de la consommation métabolique VO2 (litres/minutes) vous trouvez en fonction de la profondeur la PPO2 (Bars) dans la boucle de recyclage.

- Les valeurs en gras représentent le paramètrage optimum.
- Les valeurs grisées et en italiques représentent des points présentant un risque anoxique ou hyperoxique.

### Nx 30

| **Buse** | **VO2** | 0m | 5m | 10m | 15m | 20m | 25m | 30m | 35m | 40m | 45m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **15** | 0,5 | 0,28 | 0,41 | 0,55 | 0,69 | 0,83 | 0,97 | 1,10 | 1,24 | 1,38 | 1,52 |
| **15** | **1** | **0,25** | **0,38** | **0,50** | **0,63** | **0,75** | **0,88** | **1,00** | **1,13** | **1,25** | 1,38 |
| **15** | 2 | ***0,19*** | 0,29 | 0,38 | 0,48 | 0,58 | 0,67 | 0,77 | 0,87 | 0,96 | 1,06 |

### Nx 32

| **Buse** | **VO2** | 0m | 5m | 10m | 15m | 20m | 25m | 30m | 35m | 40m | 45m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **15** | 0,5 | 0,30 | 0,44 | 0,59 | 0,74 | 0,89 | 1,04 | 1,19 | 1,33 | 1,48 | ***1,63*** |
| **15** | **1** | **0,27** | **0,41** | **0,54** | **0,68** | **0,81** | **0,95** | **1,09** | **1,22** | **1,36** | 1,49 |
| **15** | 2 | 0,22 | 0,32 | 0,43 | 0,54 | 0,65 | 0,75 | 0,86 | 0,97 | 1,08 | 1,18 |

### Nx 34

| **Buse** | **VO2** | 0m | 5m | 10m | 15m | 20m | 25m | 30m | 35m | 40m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **15** | 0,5 | 0,32 | 0,48 | 0,63 | 0,79 | 0,95 | 1,11 | 1,27 | 1,43 | 1,59 |
| **15** | **1** | **0,29** | **0,44** | **0,59** | **0,73** | **0,88** | **1,03** | **1,17** | **1,32** | **1,46** |
| **15** | 2 | 0,24 | 0,36 | 0,48 | 0,60 | 0,72 | 0,83 | 0,95 | 1,07 | 1,19 |

### Nx 36

| **Buse** | **VO2** | 0m | 5m | 10m | 15m | 20m | 25m | 30m | 35m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | 0,5 | 0,32 | 0,48 | 0,63 | 0,79 | 0,95 | 1,11 | 1,27 | 1,43 |
| 8 | **1** | **0,27** | **0,40** | **0,54** | **0,67** | **0,81** | **0,94** | **1,07** | **1,21** |
| 8 | 2 | ***0,15*** | 0,22 | 0,29 | 0,37 | 0,44 | 0,51 | 0,59 | 0,66 |
| **11** | 0,5 | 0,33 | 0,49 | 0,66 | 0,82 | 0,99 | 1,15 | 1,32 | 1,48 |
| **11** | **1** | **0,30** | **0,44** | **0,59** | **0,74** | **0,89** | **1,04** | **1,18** | **1,33** |
| **11** | 2 | 0,22 | 0,33 | 0,44 | 0,54 | 0,65 | 0,76 | 0,87 | 0,98 |
| 15 | 0,5 | 0,34 | 0,51 | 0,68 | 0,84 | 1,01 | 1,18 | 1,35 | 1,52 |
| 15 | **1** | **0,30** | **0,46** | **0,61** | **0,76** | **0,91** | **1,06** | **1,21** | **1,37** |
| 15 | 2 | 0,26 | 0,39 | 0,52 | 0,65 | 0,78 | 0,92 | 1,05 | 1,18 |

### Nx 38

| **Buse** | **VO2** | 0m | 5m | 10m | 15m | 20m | 25m | 30m | 35m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | 0,5 | 0,34 | 0,51 | 0,68 | 0,85 | 1,02 | 1,19 | 1,35 | 1,52 |
| 8 | **1** | **0,29** | **0,44** | **0,58** | **0,73** | **0,87** | **1,02** | **1,17** | **1,31** |
| 8 | 2 | ***0,17*** | 0,26 | 0,35 | 0,43 | 0,52 | 0,61 | 0,69 | 0,78 |
| **11** | 0,5 | 0,35 | 0,53 | 0,70 | 0,88 | 1,05 | 1,23 | 1,40 | 1,58 |
| **11** | **1** | **0,32** | **0,48** | **0,64** | **0,80** | **0,95** | **1,11** | **1,27** | **1,43** |
| **11** | 2 | 0,24 | 0,36 | 0,48 | 0,61 | 0,73 | 0,85 | 0,97 | 1,09 |
| 15 | 0,5 | 0,36 | 0,54 | 0,72 | 0,90 | 1,08 | 1,26 | 1,43 | 1,61 |
| 15 | **1** | **0,34** | **0,50** | **0,67** | **0,84** | **1,01** | **1,18** | **1,34** | **1,51** |
| 15 | 2 | 0,28 | 0,43 | 0,57 | 0,71 | 0,85 | 1,00 | 1,14 | 1,28 |

## Nx 40

| Buse | VO2 | 0m | 5m | 10m | 15m | 20m | 25m | 30m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | 0,5 | 0,36 | 0,54 | 0,72 | 0,90 | 1,08 | 1,26 | 1,44 |
| 8 | **1** | **0,31** | **0,47** | **0,63** | **0,79** | **0,94** | **1,10** | **1,26** |
| 8 | 2 | 0,20 | 0,30 | 0,40 | 0,50 | 0,60 | 0,70 | 0,80 |
| **11** | 0,5 | 0,37 | 0,56 | 0,74 | 0,93 | 1,11 | 1,30 | 1,49 |
| **11** | **1** | **0,34** | **0,51** | **0,68** | **0,85** | **1,02** | **1,19** | **1,36** |
| **11** | 2 | 0,27 | 0,40 | 0,53 | 0,67 | 0,80 | 0,93 | 1,07 |
| 15 | 0,5 | 0,38 | 0,57 | 0,76 | 0,95 | 1,14 | 1,33 | 1,52 |
| 15 | **1** | **0,36** | **0,54** | **0,71** | **0,89** | **1,07** | **1,25** | **1,43** |
| 15 | 2 | 0,31 | 0,46 | 0,62 | 0,77 | 0,92 | 1,08 | 1,23 |

## Nx 42

| Buse | VO2 | 0m | 5m | 10m | 15m | 20m | 25m | 30m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **8** | 0,5 | 0,38 | 0,57 | 0,76 | 0,95 | 1,14 | 1,33 | 1,53 |
| **8** | **1** | **0,34** | **0,51** | **0,67** | **0,84** | **1,01** | **1,18** | **1,35** |
| **8** | 2 | 0,23 | 0,34 | 0,45 | 0,57 | 0,68 | 0,79 | 0,91 |
| 11 | 0,5 | 0,39 | 0,59 | 0,78 | 0,98 | 1,18 | 1,37 | 1,57 |
| 11 | **1** | **0,36** | **0,54** | **0,72** | **0,91** | **1,09** | **1,27** | **1,45** |
| 11 | 2 | 0,29 | 0,44 | 0,58 | 0,73 | 0,87 | 1,02 | 1,16 |
| 15 | 0,5 | 0,40 | 0,60 | 0,80 | 1,00 | 1,20 | 1,40 | 1,60 |
| 15 | **1** | **0,38** | **0,57** | **0,76** | **0,95** | **1,14** | **1,33** | **1,51** |
| 15 | 2 | 0,33 | 0,50 | 0,66 | 0,83 | 0,99 | 1,16 | 1,32 |

## Nx 45

| Buse | VO2 | 0m | 5m | 10m | 15m | 20m | 25m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **8** | 0,5 | 0,41 | 0,62 | 0,83 | 1,03 | 1,24 | 1,45 |
| **8** | **1** | **0,37** | **0,56** | **0,74** | **0,93** | **1,11** | **1,30** |
| **8** | 2 | 0,27 | 0,40 | 0,53 | 0,67 | 0,80 | 0,93 |
| 11 | 0,5 | 0,42 | 0,64 | 0,85 | 1,06 | 1,27 | 1,48 |
| 11 | **1** | **0,40** | **0,59** | **0,79** | **0,99** | **1,19** | **1,38** |
| 11 | 2 | 0,33 | 0,49 | 0,66 | 0,82 | 0,98 | 1,15 |

## Nx 48

| Buse | VO2 | 0m | 5m | 10m | 15m | 20m | 25m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **6** | 0,5 | 0,43 | 0,65 | 0,87 | 1,08 | 1,30 | 1,51 |
| **6** | **1** | **0,38** | **0,56** | **0,75** | **0,94** | **1,13** | **1,32** |
| **6** | 2 | 0,22 | 0,33 | 0,44 | 0,55 | 0,66 | 0,77 |
| 8 | 0,5 | 0,45 | 0,67 | 0,89 | 1,11 | 1,34 | 1,56 |
| 8 | **1** | **0,41** | **0,61** | **0,81** | **1,01** | **1,22** | **1,42** |
| 8 | 2 | 0,31 | 0,46 | 0,61 | 0,77 | 0,92 | 1,07 |
| 11 | 0,5 | 0,46 | 0,68 | 0,91 | 1,14 | 1,37 | 1,59 |
| 11 | **1** | **0,43** | **0,64** | **0,86** | **1,07** | **1,28** | **1,50** |
| 11 | 2 | 0,36 | 0,55 | 0,73 | 0,91 | 1,09 | 1,28 |

## Nx 50

| Buse | VO2 | 0m | 5m | 10m | 15m | 20m | 25m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **6** | 0,5 | 0,45 | 0,68 | 0,91 | 1,14 | 1,36 | 1,59 |
| **6** | **1** | **0,40** | **0,60** | **0,80** | **1,00** | **1,20** | **1,40** |
| **6** | 2 | 0,25 | 0,38 | 0,50 | 0,63 | 0,75 | 0,88 |
| 8 | 0,5 | 0,47 | 0,70 | 0,93 | 1,17 | 1,40 | ***1,63*** |
| 8 | **1** | **0,43** | **0,64** | **0,86** | **1,07** | **1,29** | **1,50** |
| 8 | 2 | 0,33 | 0,50 | 0,67 | 0,83 | 1,00 | 1,17 |

## Nx 52

| Buse | VO2 | 0m | 5m | 10m | 15m | 20m |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **6** | 0,5 | 0,48 | 0,71 | 0,95 | 1,19 | 1,43 |
| **6** | **1** | **0,42** | **0,64** | **0,85** | **1,06** | **1,27** |
| **6** | 2 | 0,28 | 0,42 | 0,56 | 0,70 | 0,84 |
| 8 | 0,5 | 0,49 | 0,73 | 0,98 | 1,22 | 1,46 |
| 8 | **1** | **0,45** | **0,68** | **0,90** | **1,13** | **1,35** |
| 8 | 2 | 0,36 | 0,54 | 0,72 | 0,90 | 1,08 |

## Nx 54

| Buse | VO2 | 0m | 5m | 10m | 15m | 20m |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **6** | 0,5 | 0,50 | 0,75 | 1,00 | 1,25 | 1,49 |
| **6** | **1** | **0,45** | **0,67** | **0,90** | **1,12** | **1,34** |
| **6** | 2 | 0,31 | 0,47 | 0,62 | 0,78 | 0,93 |

## Nx 56

| Buse | VO2 | 0m | 5m | 10m | 15m | 20m |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **6** | 0,5 | 0,52 | 0,78 | 1,04 | 1,30 | 1,56 |
| **6** | **1** | **0,47** | **0,71** | **0,94** | **1,18** | **1,42** |
| **6** | 2 | 0,34 | 0,51 | 0,68 | 0,85 | 1,02 |

## Nx 58

| Buse | VO2 | 0m | 5m | 10m | 15m |
|---|---|---|---|---|---|
| **6** | 0,5 | 0,54 | 0,81 | 1,08 | 1,35 |
| **6** | **1** | **0,50** | **0,74** | **0,99** | **1,24** |
| **6** | 2 | 0,37 | 0,56 | 0,74 | 0,93 |

## Nx 60

| Buse | VO2 | 0m | 5m | 10m | 15m |
|---|---|---|---|---|---|
| **6** | 0,5 | 0,56 | 0,85 | 1,13 | 1,41 |
| **6** | **1** | **0,52** | **0,78** | **1,04** | **1,30** |
| **6** | 2 | 0,40 | 0,60 | 0,80 | 1,00 |

## Nx 65

| Buse | VO2 | 0m | 5m | 10m | 15m |
|---|---|---|---|---|---|
| **6** | 0,5 | 0,62 | 0,93 | 1,24 | 1,55 |
| **6** | **1** | **0,58** | **0,87** | **1,16** | **1,45** |
| **6** | 2 | 0,48 | 0,71 | 0,95 | 1,19 |

## Propriétés physiques des gaz.

$$FiO2(t) = \frac{Qs\ FsO2 - VO2}{(Qs - VO2)} + \left(FiO2s - \frac{Qs\ FsO2}{(Qs - VO2)}\right) e^{-(1/\tau)\,t}$$

**Terme constant** — **Terme variable dans le temps**

| Gaz | Symbole | k | μ | $\rho_n$ | θ |
|---|---|---|---|---|---|
| Air | - | 1,406 | 28,96 | 1,2047 | 0,026 |
| Azote | $N_2$ | 1,404 | 28,01 | 1,1631 | 0,026 |
| Oxygène | $O_2$ | 1,416 | 32,00 | 1,3297 | 0,0263 |
| Hélium | He | 1,630 | 4,00 | 0,1759 | 0,1567 |
| Argon | Ar | 1,668 | 39,95 | 1,7837 | 0,0179 |

**Constante des gaz parfaits R : 8,314 Joule[45] / mole °K**

Avec :

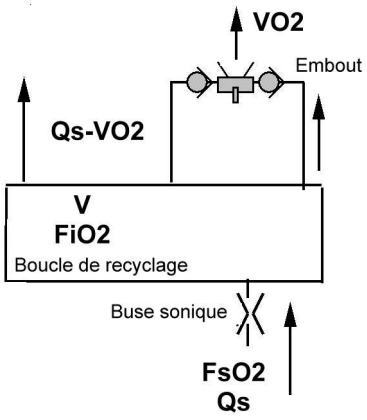
K = Constante adiabatique du gaz.

μ = Masse molaire.

$\rho_n$ = Masse volumique normale à la pression de 1 bar et à la Température de 20°C en Kg/$m^3$.

θ = Conductibilité thermique en Watt / m °K.

## Calcul détaillé de la FiO2 en mode actif




La fraction d'oxygène dans la boucle du recycleur dépend du plongeur et des caractéristiques de la machine : notamment du volume de la boucle, de la quantité de gaz frais injecté, de la fraction d'oxygène dans le gaz source.

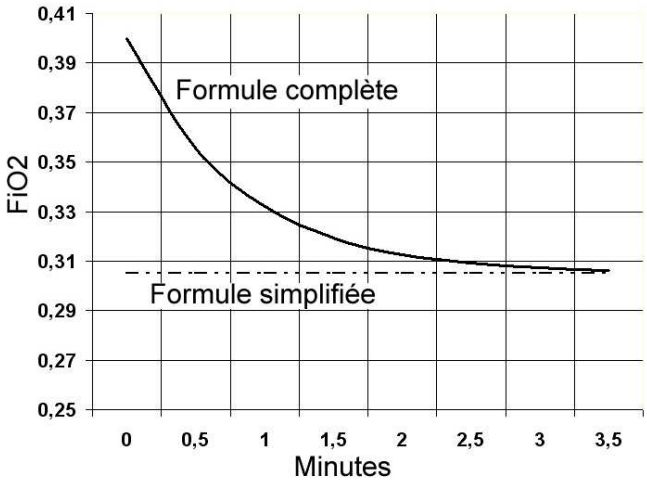
Les lois de la mécanique des fluides nous permet d'écrire l'équation différentielle de la variation de la fraction d'oxygène dans le circuit par rapport au temps.

$$\frac{d\ FiO2}{dt} = \frac{(Qs\ FsO2 - VO2(t) - (Qs - VO2)\ FiO2(t)}{V}$$

avec :

FIO2 Fraction d'oxygène dans la boucle.
Qs Débit de la buse sonique (lt / min)
FsO2 Fraction d'O2 de la bouteille .
VO2 Consommation métabolique (lt / min)
V
Volume total de la boucle de recyclage.

Après résolution de cette équation[46], analyse des conditions initiales et en posant qu'à l'instant t=0 la fraction d'oxygène dans la boucle est de FiO2s, qui correspond généralement à la fraction d'oxygène de la source il vient que :




En posant : $\tau = V / (Qs - VO2)$

τ est la constante de temps de la machine.

Le Dolphin ayant un volume global (V) de l'ordre de 12 litres, en analysant une configuration classique de la machine soit un Nx40 comme source, la buse sonique de 11 litres/minutes et une consommation métabolique de 1,5 litres/minute on constate en examinant le graphique:

- Que la formule simplifiée du chapitre 4 est amplement suffisante.
- Que cette formule ajoute un facteur sécurité en calculant uneFi02 inférieure à la réalité en début de plongée. Le risque hypoxique réel est moins élevé que le risque calculé ! .
- Que le terme variable devient très vite négligeable !

[45] 1 Joule = 1 Newton x 1 mètre = Nm

[46] La résolution de cette équation se fait au moyen des transformées de Laplace

## Quelques recycleurs.

| | |
|---|---|
| | **EDO**<br>SCR Passif et CCR<br><br>http://www.stde.ch/fr/edo04/present.php |
| | **Buddy Inspiration et Evolution**<br>CCR électronique<br><br>http://www.ambientpressurediving.com |
| | **Megalodon**<br>CCR électronique<br><br>http://www.customrebreathers.com |
| | **KISS**<br>CCR manuel<br><br>http://www.jetsam.ca/ |
| | **Azimuth**<br>SCR actif<br><br>http://www.rebreather-azimuth.com |
| | **OMG - Castoro 96**<br>SCR Oxygène pur<br><br>http://www.omg-italy.it |
| | **Halcyon RB80**<br>SCR passif<br><br>http://www.halcyon.net/ |
| | **Submatix**<br>SCR actif<br><br>http://www.submatix.com |

## Quelques ordinateurs et accessoires

| | |
|---|---|
| | **Delta P Technology Limited**<br>Ordinateur VR3<br><br>http://www.vr3.co.uk/ |
| | **Delta P Technology Limited**<br>Ordinateur VR2<br><br>http://www.vr3.co.uk/ |
| | **HydroSpace Engineering, Inc.**<br>Ordinateur HS Explorer<br><br>http://www.hs-eng.com/ |
| | **HydroSpace Engineering, Inc.**<br>Contrôleur PPO2 HS Explorer<br><br>http://www.hs-eng.com/ |
| | **Uwatec**<br>Sonde oxugène  Oxy 2<br><br>http://www.scubapro-uwatec.fr/ |
| | **Uwatec**<br>Ordinateur Air Z O2<br><br>http://www.scubapro-uwatec.fr/ |
| | **Dräger**<br>Oxygauge<br><br>http://www.danshop.com |
| | **V4TEC**<br>Adaptateur pour wing<br><br>http://www.v4tec.com |
| | **Nova Dive**<br>Masque facial<br><br>http://www.danshop.com |

# Feuille de planification S.C.R.

**Date :** **Durée totale d'utilisation de la chaux :**…….**minutes**
**Profondeur :**……**m** **Temps de plongée :** ……**minutes**

## Calculs préliminaires

| | | |
|---|---|---|
| Best Mix | FsO2 = PPO2 / [(P/10) +1] | |
| Buse sonique | Qs = 200 / (Nx – 21) | |

PPO2 :Pression partielle O2 max (Bars)
Nx : Nitrox (32, 40, 50….)
Qs :Débit de la buse sonique (ltr / min)
FsO2 :Fraction d'O2 de la bouteille
VO2 :Consommation métabolique (ltr / min)
FIO2 :Fraction d'oxygène dans la boucle
P : Pression (Bars)
Prof : Profondeur (m)
Mc : Poids de chaux (Kg)
Vc : Volume hydraulique de la source (lt)
Pb : Pression de gonflage (Bars)
Pr : Réserve ( 25 bars minimun)
Aut : Autonomie (minutes)

## Mesures

| | | |
|---|---|---|
| % O2 de la source (FsO2) | | % |
| Pression source (P) | | Bars |
| Débit buse sonique (Qs) | | Lt / min |

## Fraction d'oxygène dans la boucle

| | | |
|---|---|---|
| Normal VO2 = 1 à 1,5 | $FiO2 = \frac{[(Qs \times FsO2) - VO2]}{(Qs - VO2)}$ | |
| Essoufflement VO2=2,5 | | |

## Estimation rapide du CNS

| | Temps | %CNS | CNS | |
|---|---|---|---|---|
| CNS rémanent [1] | ---------- | ---------- | | (1)<br>0,65 pour une PPO2 de 1,4<br>0,83 pour une PPO2 de 1,5<br>2,20 pour une PPO2 de 1,6<br><br>CNS= %CNS x Temps |
| CNS plongée | | (1) | | |
| CNS paliers [2] | | 0,3 | | |
| ***Total*** | | | | |

## Calcul du bailout et de la durée totale de la plongée.

| **Bouteille = Total / 200**<br>Bouteille = litres | | **Profondeur (Prof) (mètres)** | **Temps x Pression x ψ = volume** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | **Temps (t) (minutes)** | **Pression (P) (bars)** | **ψ** | **Volume (litres)** |
| P=(Prof/10) + 1 | Bailout | | | | 20 | |
| t=Prof/10<br>P=(Prof/20) + 1 | Remontée | | | | 20 | |
| P=(Prof/10) + 1 | Palier 3m | | | | 20 | |
| | Palier 6m | | | | 20 | |
| | Palier 9m | | | | 20 | |
| | Palier 12m | | | | 20 | |
| | Palier 15m | | | | 20 | |
| Durée totale de la plongée | | | ---------- | Total sans sécu | | |
| | | | | Sécurité | | |
| | | | | Total | | |

## Calcul d' autonomie *Aut = (Vb x (Pb – Pr)) / Qs*

| Capacité source (Vb) | Pression de gonflage (Pb) | Qs | Sécurité (Pr) | Autonomie (Aut) |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

| Chaux | Poids chaux (Mc)[3] | Durée max d'utilisation = A |
|---|---|---|
| A=<br>90xMcx0,85 | | |
| | *Durée utilisée (B)* | |
| | Temps total de plongée (C) | |
| | | ---------- |
| | Reliquat | |

**Le reliquat = A-B-C doit être supérieur à zéro.**

**La durée totale de la plongée doit être inférieure à Aut**

[1] CNS réduit de la plongée précédente.
[2] Cumul de la durée totale des paliers basé sur une fraction d'O2 de 0,6 pour les paliers de 3 et 6m et 0,4 pour ceux de 9,12 et 15
[3] 2, 25 kg pour le Dolphin.

## PLONGEUR RECYCLEUR S.C.R. (Semi Closed Rebreather ) NITROX

### Prérequis :

- Avoir au moins 16[47] ans accomplis au début de la formation.
- Être titulaire d'un diplôme 2* CEDIP, 2* CMAS, OWD (RSTC), ADIP N1 ou équivalent [48].
- Être titulaire d'une spécialisation Nitrox CEDIP/ADIP, TDI, IANTD, DSAT, CMAS, PADI, NAUI, SSI ou équivalent.
- Avoir au minimum 50 plongées en milieu naturel[49] en circuit ouvert.
- Avoir au minimum 15 plongées Nitrox en milieu naturel en circuit ouvert.
- Réussir le test portant sur les connaissances du Nitrox[50].
- En cas d'échec au test ou absence de certification Nitrox, il est recommandé de grouper les formations Nitrox et recycleur.

### Modalités :

- Au moins 4 plongées totalisant un minimum de 120 minutes de temps de plongée, pour les Dolphin et Ray et 6 plongées totalisant un minimum de 180 minutes pour les autres SCR (Azimut….).
- Théorie : minimum 6 heures
- Ratio élèves/ instructeur : 6/1 pour la théorie, la pratique du montage et les tests de la machine. 1/1 pour la pratique en milieu naturel. Ce ratio peut être porté à 2/1 uniquement si la visibilité le permet, avec un aidant qualifié, c'est à dire un plongeur CEDIP 4* minimum ayant la spécialité recycleur et une expérience de minimum 15 plongées en recycleur.
- Profondeur : Maximum 30m pour tous les SCR à l'exception du Dräger Ray ou la profondeur maximum d'utilisation en formation est limitée à 20m.
- Utilisation obligatoire d'un bailout, sa capacité doit être telle qu'il permet la remontée et l'exécution du palier de sécurité aisément. Sa capacité minimale sera de 400 litres et la concentration en 02 sera calculée de manière à ne pas avoir une PpO2 supérieure à 1,4 bar.
- L'instructeur peut donner le cours en milieu naturel équipé en circuit ouvert. Il doit avoir un nombre suffisant d'octoppus et une quantité suffisante de gaz pour assurer, en sécurité, la remontée conjointe de ses élèves.
- La boucle de recyclage doit être désinfectée pour chaque élève.
- Sur le site de plongée l'instructeur doit avoir en sa possession en plus du « matériel classique » les outils spécifiques à la formation SCR, c'est à dire : un oxymètre, un débimètre, les bailouts, de la chaux sodée en suffisance, du produit pour désinfecter la boucle de recyclage…
- Bien que l'oxygauge[51] ou un ordinateur pouvant mesurer la ppo2 ne soit pas légalement obligatoire en Belgique, il est conseillé d'utiliser l'un ou l'autre durant la formation.

### Théorie

#### Module 1

- Bref rappel des notions de physique élémentaire et de Nitrox.
- Historique, comparaison entre le Circuit ouvert et les recycleurs, avantages et inconvénients des recycleurs.
- Les différents types de machines, leurs avantages et inconvénients, leurs contextes d'utilisations.
- Configuration générale des machines, position des sacs inspiratoires et expiratoires, avantages et inconvénients, le lestage

#### Module 2

- Schéma et description du SCR, descriptions des différents éléments constitutifs de la machine : embouts, sacs inspiratoire et expiratoire, scrubber, détendeur, buses soniques.
- Description des accessoires : oxygauges, ordinateurs.
- Montage et préparation de la machine, remplissage du scrubber, méthode de test des différents éléments.
- Tests finaux sur la machine : test d'étanchéité positif et négatif, mesure du débit de la buse sonique, mesure de la pression et de la concentration en O2.

#### Module 3

- Physiologie des gaz : toxicité de l'oxygène, l'hyperoxie, l'hypoxie, hypercapnie, toxicité du CO2
- Consommation métabolique d'oxygène
- Les accidents spécifiques à la plongée en recycleurs : accidents liés aux gaz, noyage de la boucle de recyclage, la « soupe caustique »
- Prévention des accidents.

---

[47] Avec autorisation parentale.
[48] Le plongeur doit être autonome. Le degré d'autonomie est défini par la norme EN 14153 de l'UE.
[49] Les fosses ne sont pas acceptables comme milieu naturel.
[50] Connaissance élémentaire du Nitrox jusqu'à 40% O2 (EAD, CNS, Mesures…) voir exemple de test en annexe.
[51] La mesure du PPO2 est obligatoire en France.

- Conduite à tenir en cas d'accident.

## Module 4

- Calcul de la fraction d'oxygène dans la boucle de recyclage (fiO2)
- Estimation de la consommation métabolique.
- Estimation de la durée d'utilisation de la chaux sodée.
- Configuration de la machine en fonction des paramètres de plongée, le best mix.
- Détermination de la capacité du bailout.
- Planification de la plongée, EAD,CNS, OTU…
- Procédure de plongée : mise à l'eau, descente, remontée, équilibrage, passage sur bailout, sortie de l'eau

## Module 5

- Notion de « what if »[52], pannes et remèdes
- Problème de test : Problème de buse sonique (débit trop important ou trop faible), le test positif ne tient pas, le test négatif ne tient pas, problème avec la membrane de by-pass, fuite au premier étage
- Problème en immersion : lestage, modification de flottabilité, ouverture du circuit, stab

## Module 6

- Procédure de démontage de la machine, entretien, désinfection, stockage .
- Examen

### Plongée en milieu naturel.

## Plongée 1

- L'instructeur montre à l'élève le montage et les tests de la machine
- Procédure de mise à l'eau, lestage, prise en main de la machine, évolution en palanquée, procédure de sortie.
- Démontage de la machine.

## Plongée 2

- L'élève effectue le montage et les tests de la machine.
- Descente dans le bleu, évolution en palanquée
- Simulation de passage sur bailout, gestion individuelle d'une situation d'urgence.
- Remontée dans le bleu, palier dans le bleu.

## Plongée 3

- Idem à la plongée 2
- Identifier les problèmes des coéquipiers et assister.
- Procédure pour utilisation d'un Nx>40% d'O2, adaptation de la buse sonique
- Procédure de remontée sous parachute, utilisation de la reels

## Plongée 4

- Idem plongée 2 et 3 mais l'élève joue le rôle de l'instructeur et vice versa
- Simulation d'une situation d'accident reprenant au minimum une hypercapnie et une ingestion de soupe caustique.

Evaluation de la consommation métabolique [53]

[52] Que faire au cas où… Méthodologie d'analyse des problèmes pouvant survenir durant la plongée !
[53] Facultatif : uniquement possible pour les machines équipées d'une mesure de PPO2